O FUTURO DA ENERGIA

Gerência de Estudos Tecnológicos e Alternativas Energéticas

REVISTA O FUTURO DA ENERGIA

CEMIG
2016

Revista O Futuro da Energia [Recurso eletrônico] / Gerência de Estudos Tecnológicos e Alternativas Energéticas/CEMIG. - Belo Horizonte, v.1, n.1, dez. (2016 -).

Anual.
Disponível em http://sgpdj.cemig.com.br/ojs/index.php/ALTENER
ISSN: **2526-1703**

1. Energia – Periódicos eletrônicos. 2. Energia - Fontes alternativas – Brasil. 3. Recursos naturais renováveis. I. Companhia Energética de Minas Gerais. Gerência de Estudos Tecnológicos e Alternativas Energéticas. II. Título.

CDD: 620.91

SUMÁRIO

Energia de Biogás da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Orgânicos e de Aterros Sanitários

Regina Mambeli Barros

Resumo – **O presente artigo objetiva apresentar uma alternativa atraente de geração de energia renovável com suas potencialidades e gargalos, a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) e sua fração orgânica (FORSU), da digestão anaeróbia de lodos de Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) e de biogás de ETEs com reatores anaeróbios, e finalmente, de digestão anaeróbia de dejetos de bovinos, suínos, aves, etc. São apresentados os resultados de algumas pesquisas à luz da questão das mudanças climáticas, da política nacional de resíduos sólidos e da política nacional de mudanças climáticas.**

Palavras-chave – **Biogás, RSU.**

I. Introdução

Há uma relação intrínseca entre o desenvolvimento da sociedade, a demanda por energia, por novos produtos e insumos, ou seja, pelos recursos naturais. O uso de combustíveis fósseis e a deflorestação configuram entre os principais dos responsáveis pelo desequilíbrio no ciclo biogeoquímico do Carbono. O carbono começou a ser lançado nos ecossistemas em uma proporção tal que tais ecossistemas não foram capazes de absorver. O aumento do CO_2 na atmosfera em decorrência das emissões antropogênicas maximizou o efeito estufa na atmosfera.

Há uma preocupação em nível mundial, ratificada na Conferência das Partes (COP), ParisCOP21, em 2015, em se reduzir as emissões líquidas de gases com efeito estufa (GEE) a fim de manter um aumento do aquecimento global abaixo dos 2°C. Isto leva a uma preocupação em como assegurar o fornecimento de energia para a demanda global e ao mesmo tempo preservando os recursos naturais e garantido o alcance das metas referente às questões climáticas.

As energias renováveis configuram-se como uma importante alternativa às fontes não-renováveis, quer seja pela substituição ou complementação das fontes de energia existentes. Novas tecnologias são fomentadas a serem pesquisadas a fim de tornar as energias renováveis mais competitivas em um cenário de descarbonização da economia.

Em outro aspecto do desenvolvimento da sociedade, apresenta-se o acréscimo na geração dos Resíduos Sólidos decorrente do aumento na produção de produtos industrializados e da demanda por matérias-primas e insumos, isto é, pelos recursos naturais. Destacam-se os resíduos orgânicos oriundos da agropecuária (dejetos de equinos, bovinos, suínos e galináceos, além de efluentes diversos), os lodos das Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e a respectiva fração orgânica (FORSU).

A Digestão Anaeróbia (DA) ou biodigestão de tais resíduos apresenta-se como uma alternativa atraente para a micro ou mini geração distribuída, conforme preconizado pela Resolução normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012) alterada pela Resolução normativa 687/2015 (ANEEL, 2015a). O biogás resultante da DA é composto principalmente pelo metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), com gases-traço como o gás sulfídrico, nitrogênio, dentre outros, além de vapor d'água, mercaptanas, etc. A composição quali-quantitativa depende de diversos fatores, como os ambientais e do substrato. Por exemplo, o biogás de aterro sanitário possui poder calorífico da ordem de 16,8 a 37,3 MJ/m^3, em função do tratamento para extração de impurezas e outros gases (BANCO MUNDIAL/ESMAP, s.d.; BARROS, 2013).

O presente trabalho apresenta uma reflexão sobre as potencialidades e obstáculos a serem ultrapassados a fim de tornar o aproveitamento energético do biogás da DA ou de aterros sanitários, competitiva com outras fontes tradicionais de geração de energia. Portanto, o aumento da participação das fontes renováveis de energia a partir de resíduos sólidos orgânicos (RSO) contribui concomitantemente, para um melhor gerenciamento integrado dos Resíduos Sólidos e para a construção de um desenvolvimento com base na supracitada descarbonização da economia, como preconizado no recente acordo do clima, resultante da COP 21 em Paris. Simultaneamente tal desenvolvimento há que objetivar a substituição da economia linear no contexto da gestão dos recursos dentro de uma economia circular, na qual a reciclagem e a recuperação estão fortemente preconizadas.

II. Aspectos climáticos e institucionais

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), adotada em 1992, foi adotada durante a Cúpula da Terra do Rio de Janeiro, a Rio92, e entrou em vigor em 1994 tendo sido ratificada por 196 Estados, os países signatários ou "Partes" para a Convenção. Possui como órgão soberano, a Conferência das Partes (COP). Anu-

R. M. Barros (remambeli@hotmail.com)
Universidade Federal de Itajubá / Instituto de Recursos Naturais. Bolsista de produtividade do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Itajubá-MG, Brasil.

almente, os países signatários da CQNUMC se reúnem a fim de avaliar a situação de mudanças climáticas no planeta. Ao final de 2015, na COP21 em Paris, visando a reduzir as emissões de GEE, os países-membros signatários da CQNUMC se reuniram objetivando elaborar um novo acordo internacional sobre o clima, aplicável a todos os países, com o objetivo de manter o aquecimento global abaixo dos 2°C.

Os países signatários da COP21 se comprometeram com contribuições nacionalmente determinadas por cada país, *Intended Nationally Determined Contribution* (INDCs, da sigla em inglês). O acordo, de 12 de dezembro de 2015, propõe manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industrial e rumo ao 1,5°C até o ano 2100. O nível projetado pela COP 21 é de 55 $GtCO_{2e}$ em 2030, reduzindo as emissões para 40 $GtCO_{2e}$ ou a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Portanto, objetiva-se garantir reduções profundas em emissões líquidas de GEE (UNITED NATIONS, 2015).

Foi instituída pela Lei federal nº 12.187/2009 a Política Nacional de Mudanças Climáticas (BRASIL, 2009), segundo a qual propõe-se a redução de emissões projetadas até 2020, entre 36,1% e 38,9%. Com relação aos níveis de 2005, a INDC do Brasil apresentada na COP21 é de redução de emissões de GEE em 2025, em 37% e em 2030, de 43% (BRASIL, 2015).

Uma vez que representa a fonte de dois terços das emissões globais de GEE, o setor de energia será crucial para determinar se os objetivos das alterações climáticas serão ou não alcançados (OECD/IEA, 2013).

Concomitantemente, para que haja o crescimento econômico, há um aumento por demanda de energia, e preferencialmente a partir de energias renováveis, e a partir de tecnologias de baixo carbono. Conforme OECD/IEA (2013), países definidos até então como grandes importadores estão se tornando exportadores, enquanto os países definidos como grandes exportadores de energia estão se tornando também, os centros principais de crescimento da demanda global. A combinação correta de políticas e tecnologias está provando que as relações entre o crescimento econômico, a demanda de energia e as emissões de CO_2 relativas à energia pode ser atenuada. A ascensão do petróleo e gás não-convencional e das energias renováveis é passível de modificar a percepção da distribuição dos recursos energéticos do mundo (OECD/IEA, 2013).

Quatro medidas de política selecionadas, com base na possibilidade de oferecer reduções significativas nas emissões de GEE do setor de energia até 2020, visando a atingir a meta dos $2^{o}C$, e não iria prejudicar o crescimento econômico em qualquer região, são listadas a seguir (OECD/IEA, 2013):

- Adoção de medidas de eficiência energética específicas (49% das reduções de emissões);
- Minimizar as emissões o metano (CH_4) decorrentes de produção de petróleo e de gás (18%);
- Limitação da construção e utilização de energia a carvão (menos eficientes);
- Aceleração (parcial) na eliminação progressiva dos subsídios ao consumo de combustíveis fósseis (12%).

O Brasil já é um líder mundial em energia renovável e planeja-se a quase duplicação da sua produção a partir de fontes renováveis até 2035, mantendo a sua quota de 43% da matriz energética nacional (OECD/IEA, 2013). No cenário Brasileiro, o Plano Decenal de Expansão 2024, PDE 2024 (MME/EPE, 2015; TOLMASQUIM, 2016a) adotou como uma das diretrizes básicas, a priorização da participação das fontes renováveis de energia para atender o aumento do consumo de energia elétrica no horizonte decenal, com o atendimento à carga de modo seguro. Segundo o PDE 2024, a capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (SIN) irá expandir 55% em dez anos, com predomínio de geração hidrelétrica (TOLMASQUIM, 2016a).

Por outro lado, o aumento da geração dos resíduos sólidos também reflete o aumento populacional e da demanda por produtos que geram resíduos e/ou rejeitos em sua produção e pós-consumo. Os resíduos sólidos são gerados a partir de atividades de origem domiciliar, públicos, de serviços de assistência sanitária à população, industriais, agropecuários, de mineração, de transportes, de saneamento, dentre outros. As emissões de GEE na gestão de resíduos sólidos podem ser oriundas do transporte durante a coleta de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) até o local de tratamento/disposição final, do tipo de tratamento se biológico ou térmico, das emissões de metano constituinte do biogás de aterros sanitários, enfim do balanço energético e de emissões de GEE nas diversas etapas de gerenciamento, quais sejam: acondicionamento, coleta, reciclagem, tratamento e disposição final.

Em 2010, foi instituída no Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) pela Lei 12.305/2010 (Brasil, 2010a), e que foi regulamentada pelo Decreto 7.404/2010 (Brasil, 2010b). A PNRS proíbe a existência de "lixões" e recomenda a formação de consórcios entre os municípios para a construção, a eliminação de resíduos sólidos urbanos e manejo de aterros sanitários. Em 2014, foi gerado no Brasil um total de 78.583.405 t/ano de RSU, sendo que 58,4% (41.600.875 t/ano) obteve a destinação final adequada e 41,6% (29.659.170 t/ano), destinados para lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2015). A referida PNRS define os resíduos sólidos como sendo quaisquer substâncias, material, objeto ou bem descartado que resulte de atividades antrópicas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados semissólido ou sólido ou, assim como os gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem irrealizável o seu lançamento em corpos d'água ou na rede pública de esgotos, ou exijam para tal, soluções econômica ou tecnicamente inviáveis, ainda que em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010a). Os resíduos podem ser originados ou oriundos de atividades de procedência doméstica, de serviços, de varrição, comercial, agrícola, hospitalar e industrial, incluindo aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição (ABNT, 2004). Após esgotadas todas as possibilidades de recuperação e tratamento por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada, os resíduos são considerados rejeitos pela PNRS (BRASIL, 2010a).

Conforme descrito pela UNEP/ISWA (2015), apresenta-se a

sequência de etapas na hierarquia do gerenciamento de resíduos sólidos, baseada no acordado entre as partes na Convenção de Basileia, COP 10, 2011 - Decisão BC-10/2: Quadro estratégico para a implementação da Convenção de Basileia para 2012-2021. A prevenção da geração de resíduos, que interatua intensamente com consumo e produção sustentáveis e que implica dentre outros aspectos, na concepção, fabricação e embalagem dos produtos no mercado, assim como nos padrões de consumo e estilos de vida. A prevenção de resíduos também tem forte relevância em outras áreas políticas complementares, tais como a "economia verde", "inovação para a sustentabilidade" e na "economia circular". No cenário brasileiro, a PNRS (BRASIL, 2010a), em seu Art. 7º, define dentre os seus objetivos, a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, assim como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.
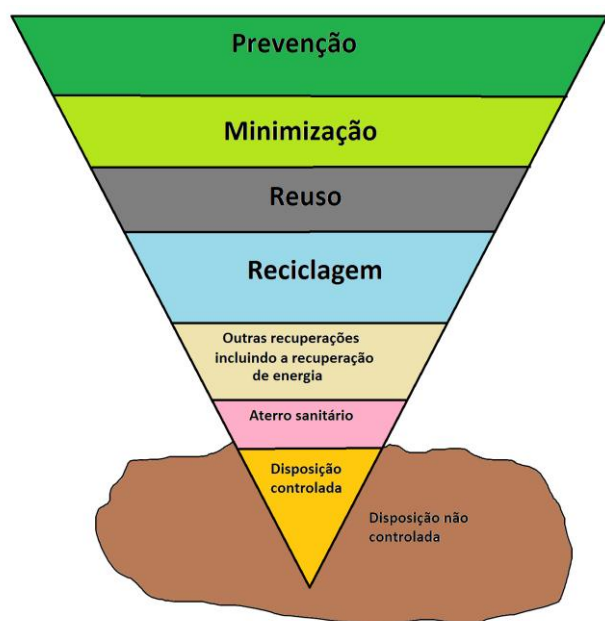
Figura 1: Hierarquia da gestão dos resíduos sólidos. Fonte: traduzido de UNEP/ISWA (2015).

O *International Panel on Climate Change* (IPCC) estima que a gestão de resíduos sólidos representou cerca de 3% dos GEE em 2010, com a maior parte desse montante atribuível às emissões de metano dos aterros sanitários. Mais de 50% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em nível mundial em 2010 foi gerado nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), e à época, a maioria dos resíduos da OCDE foi bem gerida, com biogás de aterro coletado e queimado ou utilizado na recuperação de energia. Por exemplo, a Alemanha atribuiu 24% do total das suas reduções nas emissões de GEE entre 1990 e 2006 para gestão de resíduos sólidos, mesmo que em 1990 os padrões alemães ocidentais de controle de biogás de aterro já fossem elevados (UNEP/ISWA, 2015).

De acordo com dados do Banco de Informações de Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no Brasil, em 2016, existem 15 Usinas cujo combustível é o biogás em operação, com uma capacidade total de potência de 117.760 kW. Com relação a potência outorgada, existem 3 UTE, com capacidade de 26.601 kW (ANEEL, 2016a). No tocante ao registro de micro e mini geração distribuída, conforme a ANEEL (2016b), há uma potência instalada de 2.011,08 kW a partir de aproveitamento energético de biogás. Este valor demonstra a aplicabilidade da Resolução normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012) alterada pela Resolução normativa 687/2015 (ANEEL, 2015a) que trata da micro e mini geração distribuída. Pela Resolução 482/2012 (ANEEL, 2012), os microgeradores são aqueles com potência instalada menor ou igual a 100 quilowatts (kW), e os minigeradores, aqueles cujas centrais geradoras possuem de 101 kW a 1 megawatt (MW). A Resolução Normativa nº 687/2015 (ANEEL, 2015a) ampliou os benefícios para empreendimentos, a exemplo de biogás, para até 5MW. Pela revisão, a energia excedente injetada por consumidor do Grupo A e utilizada para compensar a energia em outra unidade do Grupo B deverá observar a relação entre a soma das componentes da tarifa em R$/MWh (TUSD e TE), exceto para unidades contiguas (ANEEL, 2015b).

III. Resíduos Sólidos Urbanos

Os RSU são compostos, conforme a PNRS (BRASIL, 2010a), por aqueles englobados na categoria de resíduos domiciliares (oriundos de atividades domésticas em residências urbanas) e os resíduos de limpeza urbana (originários de limpeza de logradouros e vias públicas, da varrição, e outros serviços de limpeza urbana). Possui elevada parcela de fração orgânica, em função da renda do país. De acordo com UNEP/ISWA (2015), as FORSU são maiores em média em países de baixa e média renda (em média, 46 a 53%) quando comparado aos países de alta renda (média de 34%). No entanto, estas médias podem subestimar algumas diferenças. Um estudo comparativo contrasta uma média de 67% de FORSU, em muitas cidades de média e baixa renda, com 28% de FORSU, para as cidades na América do Norte, Europa e Austrália. Destarte, a natureza do FORSU também é distinta. Em países de média e baixa renda, a maioria dos resíduos orgânicos é "inevitável", a exemplo dos orgânicos remanescentes após a preparação de alimentos frescos (não consumíveis). Nos países de alta renda, há uma grande quantidade de desperdício de alimentos evitáveis, isto é, aqueles alimentos que poderiam ter sido consumidos.

No Brasil, a PNRS (2010a; 2010b) preconiza que apenas os rejeitos possuam a destinação final ambientalmente adequada, como o aterro sanitário. Os FORSU deveriam ser, primeiramente reciclados ou possuírem o aproveitamento energético. A compostagem e a DA seriam as alternativas para o tratamento dessa parcela tão alta de RSU. Há também a possibilidade de tratamento/disposição final dos RSU, após a coleta seletiva e triagem de materiais recicláveis, em aterros sanitários de resíduos não-perigosos.

A. *Biogás de aterros sanitários*

Os aterros sanitários devem ser projetados e operados conforme normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 13896 (ABNT, 1997) e a ABNT NBR 15849 (ABNT, 2010) e possuírem o devido licenciamento ambiental. Os aterros de RSU devem possuir características hidrogeologicas, hidrológicas e geotécnicas em conformidade com normas e legislação vigentes, com previsão de controle,

prevenção de poluição e monitoramento dos subprodutos gerados a critério do Órgão de Controle Ambiental (OCA). A massa de RSU é compactada e reduzida ao menor volume possível, a despeito do seu empolamento, e deve ser recoberta com material de cobertura ao final de um dia de trabalho ou intervalo menor, caso o fluxo de RSU seja em demasia. Há necessidade de se obter uma distância mínima entre o maior nível da superfície do lençol freático e o fundo da vala. A vala ou trincheira deve possuir proteção na base e laterais, por meio de camada de argila compactada e aplicação de geotêxtil. No ambiente predominantemente anaeróbio da massa de RSU compactada e coberta, há a formação de dois subprodutos, o biogás e o lixiviado (composto pela chuva infiltrada mais o chorume). Estes subprodutos devem ser drenados e apropriadamente tratados. O biogás, ao ser coletado, pode ser queimado ou aproveitado energeticamente.

Para análise de um projeto, deve-se prever o sistema de coleta, composto pelo campo de coleta de biogás (drenos e valas); tubulação de coleta (laterais, subcabeçotes, cabeçotes etc.); sistema de encerramento e despejo condensado; sistema de ventilação e acessórios relacionados; e queima de biogás. Além disso, deve-se prever o grau de tratamento necessário do biogás, a compressão, o gasômetro e o queimador dentre alguns custos de investimento (BARROS, 2013).

Visando a auxiliar estudos de potencial energético e viabilidade econômica em aterros sanitários, Santos *et al.* (2015) avaliaram uma estimativa de custos para usinas instaladas em aterros sanitários em função da potência a ser instalada. As estimativas obtidas foram respectivamente para motores de combustão interna como tecnologias de conversão energética e para microturbinas a gás como tecnologias de conversão energética, conforme as Equações 1 e 2.

$$I\,[10^6\ R\$] = 0{,}008P + 0{,}520 \quad (1)$$

$$I\,[10^6\ R\$] = 0{,}012P + 0{,}520 \quad (2)$$

Algumas incertezas na elaboração de projetos de aproveitamento energético de biogás de aterro sanitário existem. Parâmetros para alimentação de modelos de previsão de geração de biogás são baseados em valores de literatura e por vezes, não correspondem a uma realidade local. Há uma superestimava do potencial de captação de biogás pelo sistema de drenagem no aterro sanitário, uma vez que há perda de biogás pela superfície e migração lateral. Também, ainda dependendo do grau de purificação desejado do biogás, há acréscimo nos custos. Fatores como os supracitados influenciam na análise econômica de empreendimentos de aproveitamento energético de biogás.

Barros *et al.* (2014), estimaram e avaliaram uma gama de possíveis valores de geração de biogás terra e as capacidades instaladas de energia, considerando-se os valores extrema mínimos e máximos. Estes valores foram relacionados com as fontes de energia a partir de combustíveis residuais relatados por Balanço Energético Nacional (BEN/MME). Os resultados dos autores (*op. cit.*) mostraram que tais valores ainda representa uma pequena percentagem (0,00020% em 2010 e 0,44496-0,81042% em 2030) da geração de energia projetada a partir de combustíveis residuais. Salomon e Lora (2009) avaliaram para o Brasil, as quantidades de resíduos orgânicos oriundos da indústria de açúcar e álcool (vinhaça), RSU e efluentes líquidos urbanos (esgoto) e resíduos de animais (bovinos e estrume de suínos). Os resultados dos autores (*op. cit.*) demonstraram que o potencial sobre a produção de eletricidade a partir de biogás dos resíduos orgânicos estudados poderia atender a uma demanda nacional de energia de cerca de 1,05 a 1,13%. Os resultados do estudo de Leme *et al.* (2014), após análise e cálculo de diferentes cenários de recuperação de energia de RSU em cidades brasileiras, demostram que no Brasil os projetos de geração de energia usando biogás de aterros sanitários depende profundamente da existência de um mercado para créditos de redução de emissões (como os CERs, conforme sigla em inglês).

B. Biogás de digestão anaeróbia da fração orgânica dos RSU

Há uma possibilidade de otimizar a produção de biogás a partir dos RSU, e atender ao preconizado na PNRS (BRASIL, 2010a; 2010b), a partir de uma coleta seletiva que torne possível a reciclagem e reaproveitamento de materiais potencialmente recicláveis, incluindo a FORSU. Desse modo, conforme é preconizado na PNRS, Lei nº. 12305/2010 (BRASIL, 2010a, 2010b) e a UNEP/ISWA (2015), há que se priorizar a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos e a recuperação de energia. Para o aterro sanitário, uma disposição final ambientalmente adequada, há que se destinar apenas os rejeitos. Essa hierarquia de gestão dos RSU fomenta a economia das áreas de aterros sanitários, que possuem vida útil limitada, além de demandar monitoramento ambiental mesmo após o seu encerramento.

A FORSU representa cerca de 50% em peso do total de RSU gerado em cidades brasileiras (BRASIL, 2015a) pode ser destinada para a compostagem aeróbia, gerando o húmus, um biofertilizante, em um processo amplamente conhecido e aplicado. Também, é possível destinar a FORSU para a Digestão Anaeróbia (DA), a fim de se obter o biogás para aproveitamento energético.

A DA ocorre em um ambiente na ausência de oxigênio com uma simbiose de microrganismos, com destaque para as bactérias e *archaeas* metanogênicas e pode ser resumida em cinco etapas (BRASIL, 2015a, CHERNICHARO, 2007, BARROS, 2013; PALACIO *ET AL.* 2014a; 2014b).

- A primeira etapa, ou *hidrólise* é realizada pelas bactérias hidrolíticas que realizam a quebra (lise) das macromoléculas (carboidratos, proteínas, lípideos dentre outros) a partir do uso de exoenzimas. Elas convertem os compostos orgânicos de cadeia longa (complexos) em compostos orgânicos solúveis, como açúcares, aminoácidos, peptídeos (mais simples). Os lipídeos solúveis são convertidos em ácidos graxos, as proteínas que em aminoácidos, e os carboidratos em açúcares simples.
- A segunda etapa, ou *acidogênese* é efetuada pelas bactérias acidogênicas, pelo consumo dos produtos da fase anterior. Como resultado desse metabolismo, são gerados sobretudo os ácidos graxos voláteis (AGV), justificando o nome da etapa (gênese de ácido), com eventual queda do pH (em função da capacidade tampão do sistema), e em

menor quantidade, hidrogênio, dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, álcoois, ácido lático, amônia e formação de novas células das bactérias.

- A terceira etapa, *acetogênese*, leva esse nome, pela formação do acetato, precursor do metano, além da formação do hidrogênio e do dióxido de carbono. É efetuada pelas bactérias acetogênicas que podem ser consumidoras ou formadoras de hidrogênio, mantendo o pH do sistema.
- A quarta etapa, *metanogênese*, é efetuada pelas *archaeas* metanogênicas, e recebe esse nome, em função de haver a gênese do metano, que pode ocorrer pela via da fermentação do acetato, pelas *archaeas* metanogênicas acetotróficas (70% v/v) e pela oxidação do dióxido de carbono e hidrogênio, pela ação das pelas *archaeas* metanogênicas hidrogenotróficas (30% v/v).
- A quinta etapa, a *sulfetogênese*, é realizada pelas bactérias redutoras de sulfato (BRS), em que os compostos a base de enxofre são reduzidos a sulfeto. Há uma competição pelo substrato, sendo que as BRS possuem predominância em função de sua versatilidade no consumo de substratos. Por essa razão, é importante manter uma relação adequada entre a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e o Sulfato (SO_4^{2-}) do material FORSU que irá alimentar o reator. Caso contrário, a DA é prejudicada a ponto de haver uma porcentagem elevada de gás sulfídrico (H_2S) no biogás, diminuindo o seu poder energético e fomentando a corrosão das instalações. Em casos extremos, a não produção de metano pode levar a uma queda no valor do pH, a ponto que a alcalinidade a bicarbonato não consiga mais suprir com sua capacidade tampão, e de modo a haver até o azedamento do sistema.

Diversos fatores contribuem para o êxito da DA. A temperatura deve estar acima dos 15°C, sendo que há um ótimo local para cada faixa, mesofílica e termofílica. O pH deve estar próximo do neutro para as condições das *archaeas* metanogênicas e para tanto, a alcalinidade a bicarbonato é importante para manter a capacidade tampão do sistema. O tamanho das partículas deve ser de tal modo que a sua área superficial não acarrete em uma aceleração nas fases iniciais e consequente queda do pH, sem que se alcance a capacidade de consumo dos produtos metabólicos nas fases seguintes. A presença de substâncias em concentrações acima das quais tornam-se tóxicas, como a amônia e o sulfato, ou ainda de substâncias recalcitrantes, como os surfactantes. Também, há que se atentar para a presença de antibióticas (como em dejetos de animais) que são substâncias que podem atrapalhar a DA.

As tecnologias de DA descritas em BRASIL (2015a) são listadas a seguir:

- Temperatura do processo, sendo mesofílico (37º-42ºC) ou termofílico (50º–60ºC);
- Concentração de sólidos totais (ST), operando via úmida, via seca ou extrasseca;
- Sistema de operação, basicamente relacionado aos processos de introdução/extração do substrato, podendo ser por processo contínuo, semicontínuo ou descontínuo (bateladas sequenciais);
- Divisão das etapas de digestão, em um estágio único ou multiestágio.

As Centrais ou Plantas de Tratamento Mecânico Biológico (TMB) permitem a valorização das diferentes frações que constituem o RSU, podendo prescindir de um programa de coleta seletiva e podem ser divididas nas seções principais, quais sejam (BRASIL, 2015a):

- Sistema de pré-tratamento dos RSU;
- Digestores (reatores) anaeróbios (produção de biogás);
- Unidade de compostagem, armazenamento e refino do composto;
- Condicionamento e aproveitamento energético do biogás;
- Tratamento/disposição final da fração sólida residual, que pode ser a compostagem aeróbia;
- Instalações de correção da contaminação.

C. Digestão anaeróbia de resíduos orgânicos

Resíduos orgânicos podem compreender dentre outros, os lodos de Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), a vinhaça resultante da produção de etanol de primeira geração (1G), com novos desafios para o tratamento do efluente do etanol de segunda geração (2G), os dejetos, por exemplo, de suínos, aves de postura e bovinos. Há que se conhecer o substrato e suas características físico-químicas, a fim de se avaliar a adequabilidade ao tratamento por meio da DA, por meio da análise de características como Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), DQO, Carbono Orgânico Total (COT), Nitrogênio Total e Orgânico, pH, Alcalinidade a Bicarbonato, micro e macro nutrientes e presença de metais pesados, materiais tóxicos, inibidores ou recalcitrantes.

Previamente, explana-se brevemente sobre os tipos de tratamento biológico de tratamento dos esgotos sanitários, quais sejam aeróbios ou anaeróbios.

Um exemplo de tratamento biológico aeróbio é o sistema de lodos ativados. Nesse sistema, o esgoto passa por um gradeamento para extração de material mais grosseiro e por uma caixa de areia para extração dos sólidos inertes (areia, silte, argila). A seguir, passa pelos decantadores primários para sedimentação dos sólidos sedimentáveis (SS), no tratamento primário. No tratamento secundário, é destinado ao reator biológico, que pode possuir diversas configurações, com fluxo tipo pistão, mistura completa, aeração crescente, aeração escalonada e aeração prolongada dentre outros. Em seguida, há o decantador secundário. Nos processos aeróbios há uma formação maior de quantidade de lodo. Parte do lodo é recirculada com uma entrada no reator biológico, a fim de manter a concentração de flocos constante no reator e inocular fomentando a ação das bactérias que irão metabolizar a matéria orgânica. A outra parte do lodo secundário, juntamente com o lodo dos decantadores primários e a parte decantada da caixa de areia e limpeza das grades irão constituir os lodos das ETEs do sistema de lodo ativado. Caso necessário, pode haver um tratamento terciário, a fim de remover nutrientes como nitrogênio e fósforo. Por fim, o esgoto tratado é destinado para desinfecção para que, se atender aos padrões de lançamento da legislação vigente, seja lançado aos corpos d’água, como um efluente tratado. O lodo deve possui muita umidade, há que se desidratar e

adensar primeiramente. Tratamento químico para romper os flocos e propiciar o a digestão anaeróbia posterior pode também ser feita. Essa DA implica na geração de biogás e tem o potencial de aproveitamento energético.

O tratamento anaeróbio de esgotos pode ser exemplificado pelo uso dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente, muito conhecido por sua sigla em inglês, UASB (*upflow anaerobic sludge blanket*), possui algumas vantagens dentre elas a necessidade de área menor para implantação, menor geração de lodo e a geração de biogás. Por outro lado, a eficiência de remoção de DBO é da ordem de 60-70% e necessita, portanto, de um tratamento posterior, como um filtro biológico, para polir o efluente tratado a fim de alcançar os padrões de lançamento de efluentes tratados da legislação vigente. Há que se mencionar a necessidade de desinfecção como etapa final de tratamento na ETE por sistema anaeróbio. De acordo com Brasil (2015b), um reator UASB, acumula as funções de decantador primário, reator biológico, decantador secundário e digestor da biomassa formada (FIGURA 2).

A matéria orgânica, DQO pode ser convertida em biogás, biomassa, usada para redução dos sulfatos (SO_4^{2-}), além daquela que permanece como residual no efluente. Não obstante, conforme Van Haandel e Lettinga (1994) e Brasil (2015b), no caso de tratamento de efluentes domésticos sendo tratados nos reatores UASB, uma supersaturação do metano na fase líquida tem sido observada, e de acordo com os cálculos com base na lei de Henry, pode resultar em concentrações entre 15-50% de metano na fase líquida.

Após a coleta de biogás, deve haver transporte, manobra e monitoramento do biogás, a saber: tubos coletores de biogás inclinados para as purgas (para drenagem do condensado), com a necessidade de tanque para remoção desses condensados e dos sedimentos; dispositivos de proteção contra sobrepressão e vácuo; válvulas para controle de vazão; válvulas corta-chamas, para os trechos de gasodutos a montante de equipamentos de consumo de biogás ou de equipamentos que representem uma fonte potencial de ignição; medições de pressão e vazão, além da composição do biogás. Em seguida, deve haver o armazenamento do biogás nos gasômetros, e para os casos de excesso de biogás, de queimadores. Pode haver um tratamento do biogás para extração, gás sulfídricos, compostos orgânicos voláteis (COVs), siloxanos, mercaptanas e até do dióxido de carbono. Neste caso, obter-se-ia o biometano, cuja injeção na rede de gás natural não é permitida no Brasil, em função da Resolução da Agência Nacional de Petróleo ANP nº8/2015 (ANP, 2015). Após, o biogás segue para um conjunto motor-gerador para seu aproveitamento como energia elétrica, apesar de haver a possibilidade também do aproveitamento da energia térmica, em função do projeto proposto.

Em uma planta com aproveitamento de biogás em uma ETE, quer seja do reator UASB, quer seja dos digestores dos lodos primários e secundários de sistemas de lodos ativados deve apresentar nas etapas de projeto, Operação e Manutenção (O&M), o sistema de segurança, medidas de proteção e programa de monitoramento de riscos, em conformidade com a legislação vigente, no tocante aos riscos de acidentes com biogás, de explosão contra raios e incêndios.
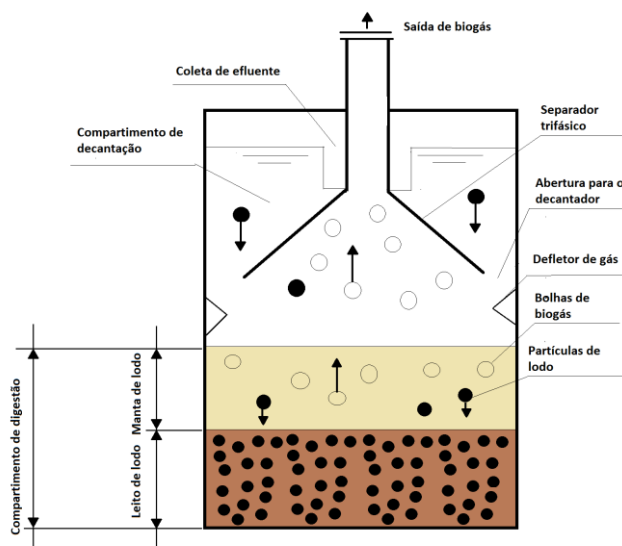
Figura 2: Representação esquemática de um reator tipo UASB. Fonte: elaborado a partir de Brasil (2015b) e Chernicharo (2007).

Felca (2016) analisou amostras de lodo oriundas das ETEs dos municípios mineiros de Varginha, Pouso Alegre, Santa Rita do Sapucaí e Itajubá as quais foram biodigeridas para análise da produção de biogás. Teores de H_2S foram encontrados no biogás da biodigestão do lodo de Santa Rita, sendo o maior valor para teor de metano encontrado para este lodo, de 18,84%; para o lodo da ETE do município de Varginha, o teor de metano foi de 52,71%, não tendo sido encontrados teores de H_2S para este e os demais municípios durante a medição dos experimentos. Valores para a produção de biogás, Pb (kg de biogás/kg de matéria orgânica) variaram de 0,050, 0,024 e 0,005 kg de biogás/kg de matéria orgânica, respectivamente para Santa Rita do Sapucaí, Pouso Alegre e Varginha. Desse modo, foi possível estimar o valor de potência útil e energia gerada para cada um dos supracitados e para essa região sul do estado. Os resultados demonstraram que esta região seria capaz de gerar teoricamente o total de 23,6 GWh/ano de energia, sendo que Pouso Alegre apresentou o melhor potencial útil teórico (329,40 kW) e Varginha, o menor (71,39 kW).

Santos *et al.* (2016) estimaram o potencial energético da geração de energia a biogás, a viabilidade económica de estações de tratamento anaeróbio de águas residuárias (esgotos sanitários), e os seus resultados indicaram viabilidade econômica apenas para cidades com população superior a 300.000 pessoas. Nestas situações, o potencial de energia poderia suprir aproximadamente 0,25% dos combustíveis residuais, de acordo com o Ministério da Ciência e Tecnologia.

A criação intensiva de animais acarreta na maior produção de dejetos, e quando em sistemas de confinamento, fomenta a biodigestão anaeróbia para produção do biogás com aproveitamento energético. Incluem-se os casos da biodigestão dos dejetos de bovinos, suínos e aves. As características e geração de dejetos variam em função da alimentação, da idade dos animais, porte e de quais animais serão biodigeridos os dejetos. Por exemplo, conforme segundo Nogueira (1992), o valor médio para bovinos, de acordo com o autor é de 10,0 kg/dia para cada cabeça. Desses fatores dependerão

o grau de digestão da alimentação e presença de macro e micronutrientes, antibióticos e características dos substratos ao biodigestor. Há que se avaliar o grau de diluição necessário para os dejetos para cada espécie, assim como, há que se pesquisar a co-digestão com outros materiais, como o capim elefante. No caso de esterco bovino a relação em peso água/esterco é de 1:1(NOGUEIRA, 1992). Nogueira (1992) apresentou como o valor esperado para produção de biogás para bovinos como sendo: 0,040 m^3/kg de dejeto.dia ou 0,400 m^3/animal.dia. Modelos de biodigestores incluem os biodigestores canadenses, indianos e chineses.

Como exemplo, menciona-se Ribeiro *et al.* (2016) que avaliaram a composição e volume de biogás produzido a partir da biodigestão anaeróbia de esterco de aves de postura de granja em Itanhandu-MG. Os experimentos objetivaram caracterizar a quantidade e composição do biogás a diferentes temperaturas, com teores de sólidos totais (ST) de 6%, 9% e 12%. Os volumes de biogás, relacionados aos Sólidos Totais Voláteis (STV) obtidos utilizando 6% ST, 9% ST, e 12% ST foram de 0,72 m^3.kg/STV, 0,42 m^3.kg/STV e 0,34 m^3.kg/STV, respectivamente.

IV. Considerações Finais

Há uma crescente preocupação com o acréscimo na demanda por energia e recursos naturais para suprir as demandas da sociedade e de seu crescimento social e econômico e que deve ser de tal modo a se compatibilizar com os objetivos do desenvolvimento sustentável. Essa não é uma equação fácil de ser solucionada, pois as variáveis podem ser conflitantes, mas que insta uma otimização a despeito dos diversos setores e áreas envolvidas no processo.

Desse modo, o desenvolvimento de tecnologias aplicáveis às energias renováveis e, sobretudo, a geração de energia a partir de resíduos sólidos apresenta-se atraente alternativa visando a otimizar o gerenciamento dos resíduos sólidos à luz do preconizado pelas Política Nacional de Resíduos Sólidos e Política Nacional sobre Mudanças Climáticas, em nível nacional e pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), conforme ratificado na COP21, França em 2015 e no contexto da economia circular, em nível internacional.

Há que se fomentar estudos, pesquisas e políticas que objetivam maximizar o aproveitamento energético das frações orgânicas dos resíduos sólidos urbanos e outros resíduos sólidos orgânicos, para que haja viabilidade técnico-econômica do apreciável potencial que tais resíduos podem oferecer, especialmente em um país tropical, cujas temperaturas médias em grande parte do território apresentam-se favoráveis a digestão anaeróbia.

Uma excelente alternativa para maximizar a participação deste tipo de energias renováveis foi alçada pelas normas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio da Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015 que altera a Resolução Normativa nº 482/2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST e a própria Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 que estabelece as condições gerais para o acesso de micro geração e mini geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica.

Portanto, seria benefício, a geração de energia a partir do biogás de aterro sanitário, para aqueles já existentes e que possuem grande quantidade de material orgânico em seu interior, em locais próximos aos centros de consumo; a produção de energia a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, a fim de economizar a vida útil dos aterros sanitários dos rejeitos, em consonância com os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos que visa a não geração, reaproveitamento e reciclagem antes que haja o aproveitamento energético dos resíduos sólidos; e finalmente, o aproveitamento energético de resíduos orgânicos como lodos de ETEs, do biogás gerados em ETEs com reatores anaeróbios (como o UASB), e da digestão anaeróbia de dejetos de suínos, bovinos, aves, etc., em um país com o setor agrossilvicultural tão proeminente.

Desse modo, há que se fomentar a otimização desse equacionamento tão complexo entre desenvolvimento social e a preservação sócio-econômico-cultural-ambiental preconizada nos objetivos do desenvolvimento sustentável, a fim de se prevenir contra os efeitos das mudanças climáticas e, ao mesmo tempo, gerenciar adequadamente os resíduos sólidos e fornecer a energia a todos.

V. Agradecimentos

A autora agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela a concessão da bolsa de produtividade em pesquisa a Prof. Regina Mambeli Barros (PQ2, número do Processo: 301986 / 2015- 0).

VI. Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO – BIG (2016a). **Capacidade de Geração do Brasil.** Combustível Biomassa. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelPorClasse.cfm?Classe=Biomassa>. Acesso em: 2 ago. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO – BIG (2016b). Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 02 ago. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa Nº 687, de 24 de Novembro de 2015. (2015a). Brasília: **Diário Oficial da União**, 02 de dezembro de 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL (2015b). **Revisão da norma que trata da micro e minigeração distribuída está em audiência.** Maio/2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8534&id_area=90>. Acesso em: 10 dez. 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012 (2012). Brasília: **Diário Oficial da União**, 19 abr. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. Resolução ANP nº8, de 30 de janeiro de 2015. Brasília: **Diário Oficial da União**, 2 fev. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE (2014). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil** – 2014. São Paulo. 2015. ISSN 2179-8303.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13896:** Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997ª. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15849:** Resíduos Sólidos Urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010. 24 p.

BANCO MUNDIAL (WORLD BANK /ESMAP). **Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe.** Conestoga Rovers & Associates (org.). Banco Mundial: Waterloo, Ontario, Canadá.

BARROS, R. M. (2013). **Tratado sobre resíduos sólidos:** gestão, uso e sustentabilidade. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta, 2013. 376 p. ISBN 978-85-7193-295-1.

BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; DA SILVA, T. R. (2014). **The electric energy potential of landfill biogas in Brazil.** Energy Policy, Vol. 65, p. 150-164. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.028>.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. MMA/EPE (2016). **Estudos da Demanda de Energia.** NOTA TÉCNICA DEA 13/15. Demanda de Energia – 2050. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2016.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. MME/EPE (2015). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024.** Brasília: MME/EPE. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Plano%20Decenal%20de%20Energia%20%E2%80%93%20PDE/MME.aspx>. Acesso em: 02 ago. 2016.

BRASIL (2015). **Pretendida contribuição nacionalmente determinada para consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima.** 10 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/BRASIL_iNDC_portugues.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2016.

BRASIL. Lei nº12,187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional de Mudança Climática; e dá outras exigências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 30 dez. 2009. Portal Planalto, 10 ago. 2012. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm>. Acesso em: 3 dez. 2015.

BRASIL. Decreto nº. 7.390, de 9 de Dezembro de 2010. Regulamenta os arts. 6, 11 e 12 da Lei nº. 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que estabelece a Política Nacional de Mudança do Clima - PNMC, e dá outras exigências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 10 dez. 2010. Portal Planalto, 10 ago. 2012. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7390.htm>. Acesso em: 3 dez. 2015.

BRASIL. Lei nº.12,305, de 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei no. 9.605, de 12 de Fevereiro de 1998; e dá outras exigências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 03 ago. 2010. Portal Planalto, 10 ago. 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 3 dez. 2015.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás (2015a). **O estado da arte da tecnologia de metanização seca**. Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autor: Luis Felipe de Dornfeld Braga Colturato. Brasília, DF. 97p. ISBN 978-85-7958-040-6.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás (2015b). **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto.** Probiogás ; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores: SILVEIRA, B. et al. Brasília, DF. 183 p. ISBN 978-85-7958-041-3.

CHERNICHARO, C. A. L. (2007). **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias:** Reatores Anaeróbios. 2a.ed. Belo Horizonte: Departamento de engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

FELCA, A. T. A. (2016). **Análise do potencial energético proveniente do lodo de esgoto produzido pelas estações de tratamento do sul de Minas Gerais.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – OECD/IEA (2016). **World Energy Outlook.** Special Report Energy and Air Pollution. Special Report. Executive Summary. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlookSpecialReportEnergyandAirPollution_Executivesummary_EnglishVersion.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – OECD/IEA (2013). **World Energy Outlook.** Special Report Energy and Air Pollution. Special Report.. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlookSpecialReport2016EnergyandAirPollution.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – OECD/IEA MME (2015a). **Complementary measures for decarbonisation.** Looking beyond pricing and regulation to motivate private businesses and state-owned enterprises. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/COP21_Complementary_Measures_Brochure.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – OECD/IEA MME (2015b). **Energy Matters How COP21 can shift the energy sector onto a low-carbon path that supports economic growth and energy access.** Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Energy_Matters_Brochure.2.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – OECD/IEA MME (2013). **Electricity in a Climate-Constrained World** - Data & Analyses. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ElecClimate2012_free.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – OECD/IEA MME (2012). **Technology Roadmap** - Hydropower. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012_Hydropower_Roadmap.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2016.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão:** a alternativa energética. São Paulo: Nobel, 1992.

PALACIO, J. C. E. et al. (2014a) . Processos biológicos de conversión. In: Martínez, José María Rincón; Lora, Eduardo Electo Silva. (Org.). **Bioenergía:** Fuentes, Conversión y sustentabilidad. 1 ed.Bogotá-Colombia: La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, p. 123-164.

PALACIO, J. C. E. et al. (2014b) . Generación de energía a partir de los residuos sólidos urbanos. In: Martínez, José María Rincón; Lora, Eduardo

Electo Silva.. (Org.). **Bioenergía:** Fuentes, Conversión y sustentabilidad. 1ed. Bogotá-Colombia: La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, p. 245-296.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. (2009). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 33, Issue 9, 2009, p. 1101-1107, Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001>.

LEME, M. M. V. et al. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in **Brazil, Resources, Conservation and Recycling**. Vol. 87, 2014, p. 8-20, ISSN 0921-3449. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.003>.

RIBEIRO, E. M. et al.(2016). **Power Generation Potential in Posture Aviaries in Brazil.** Waste Management (artigo submetido).

SANTOS, I. F. S. et al. (2015). Use of biogas from sanitary landfills for electricity generation: a study of the deployment costs. In: **Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2015** "Bioenergy For Electricity Generation And Ecological Issues In Power Plants", 11., São José dos Campos, Brazil.

SANTOS, I. F. S., BARROS, R. M., TIAGO FILHO, G. L. (2016). **Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil:** an assessment of feasibility and potential. Journal of Cleaner Production, vol. 126, p. 504-514. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.072.

TOLMASQUIM, M. T. (coord.) (2016a). **Energia Renovável:** Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. EP: Rio de Janeiro. 452p. ISBN 978-85-60025-06-0. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2016.

TOLMASQUIM, M. T. (coord.) (2016b). **Energia Termelétrica:** Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear. EPE: Rio de Janeiro. ISBN 978-85-60025-05-3. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2016.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION. UNEP/ISWA (2015). **Global Waste Management Outlook.** ISBN: 978-92-807-3479-9. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2016.

UNITED NATIONS (2015). **Framework Convention on Climate Change:** adoption of the Paris agreement - FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. UNFCCC. 12 dez. 2015. Disponível em: <http://unfccc.int/files/bodies/awg/application/pdf/draft_paris_agreement_5dec15.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2015.

VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. (1994). **Tratamento anaeróbio de esgoto.** Um manual para regiões de clima quente. Campina Grande, Brasil, Universidade Federal da Paraíba.

VII. COPYRIGHT

Panorama do Ensino de Engenharia de Energia no Brasil

Virgilio Almeida Medeiros[1]

***Resumo* – O artigo apresenta um panorama do ensino de engenharia de energia no Brasil, relatando a experiência do autor no ensino na Universidade FUMEC, uma das principais formadoras de mão de obra no Brasil, uma das pioneiras no estado de Minas Gerais.**

***Palavras-chave* – Engenharia, Ensino.**

I. Introdução

O ensino de Engenharia de Energia no Brasil é muito recente. Enquanto em países europeus, amplia-se esta graduação no segmento ensino à distância (EAD), em nosso país somente recentemente foi aprovada a criação do título profissional para os novos formandos. Aqueles que desde 2008 já estão formados receberam titulação e atribuições discordantes daquilo que tiveram oportunidade de aprender junto à comunidade acadêmica e tem vivenciado no seu dia-a-dia profissional.

Essa modalidade de Engenharia capacita o profissional para: planejar, analisar e desenvolver sistemas de geração, transporte ou transmissão, distribuição e utilização de energia, lidar com todas as formas de energia que compõem a matriz energética brasileira - seja ela renovável, como hídrica, solar, eólica ou de biomassa, seja não renovável, obtida de petróleo, carvão, gás natural ou material radioativo, como o urânio (usado em usinas nucleares). No setor público, ele pesquisa e traça estratégias para o setor energético, além de avaliar as necessidades de uma região ou setor e desenvolver projetos econômica e socialmente viáveis, sempre buscando soluções seguras e sustentáveis, que não agridam o meio ambiente. Suas atividades também compreendem coordenar programas de contenção e uso racional da energia (ABRIL, 2016).

Quanto ao mercado de trabalho, este encontra-se favorável a esta modalidade de engenheiro, pois necessita-se aumentar a oferta de energia e elevar a eficiência do setor energético e elétrico brasileiro, o que constitui uma grande preocupação governamental. E, para isso, é preciso formar bons profissionais, informa o coordenador do curso de Engenharia de Energia da PUC Minas, Otávio de Avelar Esteves (ABRIL, 2016). O campo de atuação é vasto e inclui empresas geradoras, transmissoras, distribuidoras e comercializadoras de energia, além de órgãos governamentais, onde o graduado formula políticas públicas para o setor. Ainda pode ser autônomo, e prestar consultoria em eficiência energética. A busca por novas fontes de energia (eólica, solar e marítima, tirada das ondas do mar) abre mercado em pesquisa e desenvolvimento. Há vagas nos setores petrolífero, petroquímico e metal-mecânico, principalmente em polos industriais do Sudeste e do Sul. Os parques eólicos ganham expressão no Nordeste, particularmente em Pernambuco e no Ceará; e a geração de energia de biomassa é promissora, no Paraná e em Santa Catarina.

Quanto à formação acadêmica, conforme verificamos no site da FUMEC:

> "Os cursos de engenharia, dos mais diversos tipos, são divididos basicamente entre as disciplinas básicas, que oferecem a formação inicial ao aluno; as disciplinas profissionalizantes, as específicas e as complementares, que possibilitam a formação específica ao aluno. Complementando essa formação acadêmica, existe também o Projeto Integrado (PIN) e o Trabalho Final de Curso (TFC), trabalhos acadêmicos em que os alunos irão realizar estudos de caso, para fazer uma análise da sua área de atuação em determinada cidade. A formação de um aluno não é feita exclusivamente em sala de aula, é complementada por aulas práticas em laboratórios (Física e Eletrotécnica; Informática; Mecânica dos Solos; Saneamento Ambiental; Eletrônica Analógica e Circuitos Elétricos; Química Tecnológica e Ambiental; Eletrônica Digital e Medidas Elétricas; e Recursos Energéticos) e também visitas em empreendimentos (empresas, indústrias, projetos, etc.) que atuam nas áreas específicas. A faculdade oferece também trabalhos de iniciação científica aos alunos do curso, em parceria com outros cursos, a fim de possibilitar, aos graduandos, a realização de estudos na área, bem como se habituarem a trabalhos de pesquisa, como por exemplo, os cursos de Engenharia Ambiental e Arquitetura" (FUMEC, 2016).

No Brasil, atualmente, existem dezenas de cursos deste tipo, mas o curioso é que quando realizamos uma busca do tema "Engenharia de Energia" no GOOGLE (fonte de pesquisa na Internet), o resultado apresenta um portal em destaque que é sediado em Portugal (PORTAL ENERGIA, 2016) indicando uma grande lacuna com a mais importante ferramenta de divulgação entre a população jovem, quando se trata de ensino e pesquisa nessa área inovadora.

Em segundo lugar na pesquisa na internet, aparece o site da ONU no Brasil, fornecendo um curso *on-line* com o pompo-

[1] A. Medeiros (medeiros@fumec.br). Professor da Universidade FUMEC desde 2011. Engenheiro Eletricista pela PUC-MG, Especialista em Sistemas Elétricos de Potência, MBA em Gestão de Negócios pela FGV, Mestrando em Engenharia da Energia no CEFET-MG, Trabalhou na CEMIG durante 25 anos. Pesquisador e Consultor em Energias renováveis. Belo Horizonte, Brasil.

so nome de Curso Técnico/Capacitação, que na verdade somente possui uma introdução ao assunto e no modelo "autodidata" (RENERGY OBSERVATORY, 2016).

Quem pensa que nossos jovens não consultam o buscador citado e não fazem esses cursos de formação rápida, não conhece nossa realidade de investimentos em educação *online* tremendamente interligada nas redes sociais disponíveis a todos os brasileiros. São 12 Milhões de pessoas, segundo a EBC Agência Brasil (2016) que estão utilizando sites voltados para a alfabetização, preparando estudantes para o vestibular e para o Exame Nacional do Ensino Médio (Enem) além de diversas especializações.

As instituições de ensino não têm utilizado as mídias digitais para garantir a divulgação dos conteúdos de seus cursos e diante disso, existem poucos profissionais de carreira, sendo o curso realizado por professores idealistas e escolas pioneiras na formação desses profissionais.

As empresas brasileiras ainda não conhecem a modalidade de Engenharia de Energia e ainda não estão engajadas na abertura de vagas de emprego ou estágio aos estudantes..

II. O Curso de Engenharia de Energia

Inicialmente, temos como destaque, o início da primeira oferta do curso de Engenharia de Energia no ano de 2003 no Brasil. O primeiro curso no país teve início na UERGS-Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, iniciando o ano letivo em março.

Seguindo a mesma linha, a Universidade Federal do Pampa (conhecida também como Unipampa) iniciou a oferta do curso somente em 2006, 3 anos após a UERGS. O curso da Unipampa é focado em Energias Renováveis e Ambiente.

Já em 2007, devido ao crescente interesse e demanda perante o curso de engenharia de energia, outras universidades do país também iniciaram a oferta do curso, como podemos destacar: a PUC de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, a Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) e a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (Ufersa).

Com a crescente necessidade de profissionais na área, outras universidades públicas de renome também viram a oportunidade de ofertar o curso de Engenharia de Energia em 2008, sendo elas: UnB (Universidade de Brasília) e a UFGD (conhecida também como Universidade Federal da Grande Dourados). A Universidade FUMEC instalou seu curso de Engenharia Bioenergética (somente renováveis) em fevereiro de 2008.

A Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) já ofertava cursos de especialização (*Strictu Sensu*) na área de Engenharia de Energia, sendo que desta forma aproveitou para iniciar os programas de graduação na área em 2009.

No período que compõe o ano de 2010 é possível observar o início do curso de engenharia de energia em várias universidades, como a Universidade Federal de Itajubá, Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a Universidade Federal do Estado de São Paulo. Uma das vantagens de cursar engenharia de energia nos grandes centros é a possibilidade maior de realizar estágios supervisionados na área com grandes chances de empregabilidade.

A lista de todos os cursos homologados pelo MEC, encontra-se no portal do e-MEC (2016).

III. Disciplinas Principais

Reconhece-se que a formação dos profissionais está sendo realizada em uma área interdisciplinar de engenharia e algumas vezes poderá ser confundida ou permeará outra especialidade.

A Base Legal dos cursos de engenharia está pautada na: Resolução CNE/CES nº 11, de 11.03.2002 (CNE, 2002), que preconiza que o engenheiro estará capacitado para:

a) aplicar conhecimentos matemáticos, científicos, tecnológicos e instrumentais à engenharia;
b) projetar e conduzir experimentos e interpretar resultados;
c) conceber, projetar e analisar sistemas, dispositivos, produtos e processos;
d) planejar, supervisionar, elaborar e coordenar projetos e serviços de engenharia;
e) identificar, formular e resolver problemas de engenharia;
f) desenvolver e/ou utilizar novas ferramentas e técnicas;
g) supervisionar a operação e a manutenção de sistemas;
h) avaliar criticamente a operação e a manutenção de sistemas;
i) comunicar-se eficientemente nas formas escrita, oral e gráfica;
j) atuar em equipes multidisciplinares;
k) compreender e aplicar a ética e responsabilidade profissionais;
l) avaliar o impacto das atividades da engenharia no contexto social e ambiental;
m) avaliar a viabilidade econômica dos projetos de engenharia;
n) assumir a postura de permanente busca de atualização profissional.
o) empreender, construir seu futuro, procurar seu nicho de trabalho, conviver com o risco, enfrentar desafios;
p) atuar como transformadores sociais visando o bem-estar social;
q) avaliar os impactos sociais e ambientais de suas intervenções, reagindo eticamente.

Por se tratar de um curso de formação de base em ciências exatas, o curso de Engenharia de Energia caracteriza-se por uma perspectiva multidisciplinar englobando parte dos conteúdos tipicamente tratados pelas áreas de Engenharia Mecânica, Elétrica, Química e de Produção. No Projeto Pedagógico, está presente uma boa base de matemática e de cálculo. Incluem-se ainda a física e química básicas. Para cumprir o requisito de transformação/conversão de energia, os currículos possuem as disciplinas de Termodinâmica (I e II), Mecânica dos Fluidos e Transporte de Calor e Massa. Para atender à geração de energia, os alunos aprendem Eletromagnetismo, Circuitos e Medidas Elétricas, Transmissão e Distribuição de Energia.

A partir daí cada universidade passa a adotar um caminho diferente (ênfase), priorizando as energias renováveis ou as de origens fósseis e nucleares, por uma questão de mercado de trabalho ou proximidade com grandes empresas geradoras de um tipo específico de energia (eólica no Nordeste e Sul) ou grandes centros de transformação (Petróleo, no Sudeste). São muitas as variáveis e também são oferecidas entre 20 e 30 disciplinas optativas para tentar direcionar os alunos em seu campo profissional. Alguns desses cursos ainda estão em fase de estruturação e não tem idênticos objetivos. O curso da FUMEC (2008) possui 3.820 horas/aula, a PUC-Minas (2007) oferece 3.600 horas/aula e a Universidade de Novo Hamburgo/RS (2002) a graduação requer 4.470 horas/aula.

Estas são as principais razões da não uniformidade dos cursos de engenharia de energia. Como ser generalista e atender ao mercado específico de aplicações? Este também é o maior desafio do curso, ter um profissional pluralista que pode fazer parte de uma equipe específica dos projetos já existentes.

Com a carga horária atendida pelo MEC, os cursos de graduação têm obtido boas notas na avaliação (entre 3 e 5, nota máxima). Possuem e investem em bons laboratórios e os professores têm titulação de Mestres ou Doutores.

IV. Regulamentação nos Conselhos

A resolução do CONFEA-Conselho Federal de Engenharia e Agronomia, órgão regido pela Lei 5.194 de 1966 (CONFEA, 1966) que zela pelos interesses sociais e fiscaliza o exercício profissional de cerca de um milhão de cadastrados em centenas de títulos diferentes. É a instância máxima à qual pode recorrer no que se refere à regulamentação de seu exercício profissional.

Foi publicado no Diário Oficial da União nessa quarta-feira, 13 de julho, a **Resolução N° 1.076, de 5 de julho de 2016, (CONFEA, 2016)**, que discrimina as atividades e competências profissionais do engenheiro de energia e insere o respectivo título na Tabela de Títulos Profissionais do Sistema CONFEA/CREA.

O CONFEA (Conselho Federal de Engenharia e Agronomia) atua como instância superior da verificação, fiscalização e aperfeiçoamento do exercício e das atividades profissionais da Engenharia.

A tramitação da proposta de resolução da Engenharia de Energia passou pelas etapas finais a partir do início desse ano, com a sistematização dos resultados da consulta pública finalizada em dezembro de 2015 e posterior aprovação do texto pela Comissão de Educação e Atribuição Profissional (CEAP) em abril. No dia 01 de julho, a proposta foi aprovada na Plenária do CONFEA, última instância de aprovação necessária.

A Resolução 1.076 estabelece que:

"Art. 2º Compete ao engenheiro de energia o desempenho das atividades 1 a 18 do art. 5º, §1º, da Resolução nº 1.073, de 19 de abril de 2016, referentes a geração e conversão de energia, equipamentos, dispositivos e componentes para geração e conversão de energia, gestão em recursos energéticos, eficiência energética e desenvolvimento e aplicação de tecnologias relativas aos processos de transformação, de conversão e de armazenamento de energia.

Art. 3º O engenheiro de energia poderá atuar também no desempenho das atividades 1 a 18 do art. 5º, §1º, da Resolução nº 1.073, de 2016, referentes a transmissão, distribuição, conservação e armazenamento de energia, em função estritamente do enfoque e do projeto pedagógico do curso, a critério da câmara. "

A inserção do título de Engenheiro/Engenheira de Energia na Tabela de Títulos Profissionais do Sistema CONFEA/CREA permite aos profissionais formados pelo Curso de Engenharia de Energia obter o **registro profissional** para atuarem nas áreas definidas pela resolução.

Conforme visto acima, cabe ao Sistema CONFEA-CREA (*a critério da câmara*) verificar a validade dos diplomas já emitidos desde 2008 nos quais os profissionais formados ainda não possuíam estas competências definidas e regulamentadas. Alguns profissionais precisarão passar por processo de complementação de formaçãonas áreas de *equipamentos, componentes e dispositivos para geração, gestão de recursos energéticos, eficiência energética* (antes restrita ao curso de Engenharia Elétrica), ou ainda se quiserem ampliar suas qualificações profissionais cobrindo a área de *transmissão, distribuição, conservação e armazenamento de energia.*

.Vivencia-se um momento de crise no ensino superior. O ex-reitor da UFRJ afirma que a captação de novos estudantes neste ano letivo (2016) foi reduzida em mais de 25% e a perda de alunos matriculados chega a 20% do total. E afirmou que "- se considerarmos que hoje mais de 7 milhões de estudantes estão nas universidades, com cerca de 80% no setor privado e, levando em conta que cada estudante custa pelo menos 8 mil reais por ano, estaremos chegando a incrível perda de cerca de 6 bilhões de reais por ano. Assim, surgem motivos de sobra para a falta de sustentabilidade de muitas instituições privadas de ensino superior." Afirmando ainda que: "Este pujante sistema de educação superior, com mais de 3 mil instituições, que oferecem 30 mil cursos de graduação e milhares de programas de mestrado e doutorado, é um dos motores do nosso desenvolvimento. Se continuar a ser relegado aos planos secundários nas políticas públicas, provavelmente, estaremos condenando o país a um retrocesso ainda maior." (O GLOBO, 2016).

O Plano Nacional de Educação (PNE, 2016) propõe a elevação da taxa bruta de matrículas na educação superior de 34,2%, em 2014, para 50% até 2014. As instituições terão que provar sua resistência, como num vestibular. Realmente um desafio a sobrevivência das instituições..

V. Sugestões De Mudança

As instituições de ensino público e privado se reuniram em Brasília/DF em 2014, a fim de elaborarem um plano de convencimento ao CONFEA para regulamentação da Engenharia de Energia. Os resultados desta "força-tarefa" se concretizam com a Resolução 1.076/2016.

Isto resgata uma dívida Universidade-Aluno com o título profissional que está inscrito na Carteira do CREA. Espera-se que o mercado de trabalho possa integrá-lo e dar-lhe a dignidade merecida e conquistada.

Torna-se necessária uma harmonização e sincronismo de ações entre o Ministério da Educação e os conselhos de classe, em especial ao sistema CONFEA-CREA em favor do ensino e da profissionalização do país. Flexibilidade com responsabilidade e agilidade é o que se espera dos mantenedores do arcabouço educacional do Brasil em favor dos direitos dos cidadãos e com objetivo de construção de uma sociedade melhor, mais educada, profissional e sustentável.

Novas resoluções começam a serem esboçadas indicando dias melhores. A regra passa a ser “cumpriu a carga horária, conquistou a capacitação e a competência para exercer a atividade profissionalmente”, como é estabelecida nos países desenvolvidos.

VI. Considerações Finais

O ensino da Engenharia de Energia é imprescindível ao Brasil, assim como a formação dos bons profissionais, capacitados e adequados para imprimir ao país uma nova infraestrutura de energia baseada em soluções sustentáveis.

A adoção de uma matriz energética mais limpa e investimentos proporcionais às energias fósseis tão privilegiadas, mas ambientalmente comprometedoras, e com forte apelo de esgotamento em algumas décadas. O Engenheiro de Energia trará a solução para o planeta energodependente.

O nível de desenvolvimento humano (IDH) está ligado diretamente à intensidade do uso de energia utilizada para os serviços essenciais da vida do cidadão, promovendo seu bem-estar, sua saúde e seu desenvolvimento harmônico com o ambiente em que vive.

A energia, para movimentar máquinas, gerar calor para os processos, ser utilizada para encurtar as distâncias através da logística sustentável diminuindo os impactos na sociedade moderna e em seu modelo econômico.

Dizer sim às fontes renováveis é garantir a diminuição dos teores de CO_2 da atmosfera. Os engenheiros inovadores terão a tarefa de buscar sempre as energias ambientalmente corretas e socialmente inclusivas beneficiando a coletividade com suas soluções inovadoras.

Energia das marés, das ondas e das correntes oceânicas, os aproveitamentos geotérmicos e eólicos distribuídos pelo planeta devem ser explorados em prol do suprimento energético mundial. A energia solar que atinge a Terra diariamente, poderia atender a nossa demanda anual de energia com sobra. O sol necessário para geração da biomassa renovável e carbono neutra. São necessárias mais pesquisas e investimentos nas novas modalidades de energia que trarão certamente respostas mais consistentes às necessidades energéticas de produção e desenvolvimento.

Espera-se que a Engenharia de Energia se amplie e se desenvolva para trazer respostas rápidas às necessidades crescentes de energia da sociedade, mas também que possa se pensar em produzir mais com menos energia e eficientizando processos e equipamentos, equilibrando e reutilizando materiais que podem ser reprocessados em uma cultura circular avaliando o ciclo de vida virtuoso de cada material.

VII. Referências Bibliográficas

ABRIL – Editora Abril. **Guia do Estudante.** Disponível em: <http://guiadoestudante.abril.com.br/profissoes/meio-ambiente-ciencias-agrarias/engenharia-energia-685541.shtml>. Acesso em: 10 out. 2016.

CAMARA NACIONAL DE EDUCAÇÃO – CNE. RESOLUÇÃO CNE/CES 11, DE 11 DE MARÇO DE 2002. Disponível em: http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES112002.pdf . Acesso em: 10 de nov. 2016.

CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA – CONFEA. Resolução N° 1.076, de 5 de julho de 2016. Disponível em: < http://normativos.confea.org.br/downloads/1076-16.pdf >. Acesso em: 04 de nov. 2016.

EBC Agência Brasil. Educação no Brasil. Disponível em: < http://agenciabrasil.ebc.com.br/educacao/noticia/2016-03/mais-de-12-milhoes-de-brasileiros-acessam-ferramentas-de-educacao-pela >. Acesso em: 15 de nov. 2016.

e-MEC. Instituições de Educação Superior e Cursos Cadastrados. Disponível em: < http://emec.mec.gov.br/ >. Acesso em: 20 de nov. 2016.

FUMEC – Fundação Mineira de Cultura. **Engenharia Bioenergética:** Apresentação. Disponível em: <http://www.fumec.br/index.php/cursos/graduacao/engenharia-bioenergetica/apresentacao/>. Acesso em: 10 out. 2016.

GLOBO - Jornal o Globo. **A crise é grave no ensino superior.** Disponível em: <http://noblat.oglobo.globo.com/artigos/noticia/2016/04/crise-e-grave-no-ensino-superior.html >. Acesso em: 10 out. 2016.

LEI Nº 5.194, DE 24 DEZ 1966. Disponível em: < http://normativos.confea.org.br/ementas/visualiza.asp?idEmenta=25 >. Acesso em: 04 de nov. 2016.

PNE – Plano Nacional de Educação (2014/2024). MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO – MEC. Disponível em: <http://pne.mec.gov.br/>. Acesso em: 10 out. 2016.

PORTAL ENERGIA. ENERGIAS RENOVÁVEIS. Disponível em: < http://www.portal-energia.com/contactos/ >. Acesso em: 01 de nov. 2016.

RENERGY OBSERVATORY. Programa de Capacitação. Disponível em: <http://www.renenergyobservatory.org/br/programa-de-capacitacao.html >. Acesso em: 10 de nov. 2016.

SEMESPE - Sindicato das empresas de ensino superior. **Ensino superior sofre com crise, Fies e inadimplência.** Disponível em: <http://www.gazetadopovo.com.br/educacao/ensino-superior-sofre-com-crise-fies-e-inadimplencia-0qnx88czbtuzgu5nu7x7ectjt>. Acesso em: 10 out. 2016.

VIII. COPYRIGHT

Pilhas a Combustível de Óxido Sólido: uma Excelente Opção Energética

Rosana Zacarias Domingues, Tulio Matencio, Rafaela Marinho Fonseca, Antônio de Pádua Lima Fernandes, Marina Domingues Fernandes

***Resumo* – Eficientes. Sustentáveis. Confiáveis. Na busca por novas fontes energéticas, as pilhas a combustível surgem como uma forte e versátil opção, encontrando aplicações desde a simples carga de um celular ao fornecimento de energia aos parques industriais.**

***Palavras-chave* – Hidrogênio, Pilha a Combustível de Óxido Sólido.**

I. Introdução

Qual o futuro da energia?

Já há algum tempo, diversas conferências abordando o tema energia têm sido promovidas numa escala global. Conferências sobre emissões de gases de efeito estufa, desenvolvimento econômico, erradicação da pobreza mundial, todas essas, de alguma forma, tangem essa indagação inicial. Embora o uso de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) tenha proporcionado o nível de desenvolvimento que vivemos, os mesmos levaram a crises energética, ambiental e social. Os indícios da exaustão do atual modelo energético mundial impulsionaram pesquisas voltadas para formas alternativas de geração de energia, com ênfase em fontes renováveis, apresentadas como metas de governos para os próximos anos. Ao mesmo tempo, as crescentes discussões relativas ao desenvolvimento sustentável evidenciam a dificuldade de se utilizar energias limpas numa escala global.

Sob uma perspectiva histórica da evolução do uso dos recursos energéticos nas últimas duas décadas, não há indícios para o esgotamento de combustíveis fósseis para os próximos decênios. Pelo contrário, somente as reservas de petróleo aumentaram em 60% nos últimos 20 anos, acompanhadas por um aumento de 20% na sua produção. A exemplo também, se considerarmos as duas maiores economias mundiais, tanto a China quanto os Estados Unidos usam o carvão como sua principal fonte de abastecimento energético – 79% para China e 40% EUA (WEC, 2013).

Ainda assim, apesar de um otimismo quanto à disponibilidade de recursos naturais usados para atender a atual demanda energética, os impactos causados pela emissão de CO_2, pela geração de resíduos de usinas nucleares ou até mesmo pelos conflitos geopolíticos, indicam a urgência de desenvolvimento e utilização de fontes alternativas de energia. Em termos de poluição por CO_2, por exemplo, estima-se que o setor energético seja responsável por cerca de 90% das emissões. Estima-se também que, para manter o aumento da temperatura global entre 2,0°C e 2,4°C nos próximos anos, os níveis de emissão de CO_2 devem ser reduzidos entre 50% e 85% a partir de 2015 (IPCC, 2014).

A complexidade de se atingir essas metas é ampliada ao se contabilizar o crescimento na demanda de energia devido apenas a inclusão da população rural, sem acesso a bens intensivos em energia nos países em desenvolvimento ou subdesenvolvidos. As projeções passadas sobre crescimento do uso de energia falharam drasticamente ao subestimarem o quanto a universalização da energia, principalmente na África e Ásia, contribuiria para esse aumento. Hoje, fazer com que o desenvolvimento da eletrificação seja capaz de suprir o crescimento da demanda é um dos principais desafios para o setor energético (WEC, 2013). Aliar o acesso à energia ao uso de fontes limpas condizentes aos princípios de sustentabilidade é ainda mais obscuro.

Contudo, apesar de lenta, a transição para fontes renováveis de energia ocorre e é cada vez mais necessária (WEC, 2013). As sucessivas reuniões para se discutir as questões ambientais motivam os governos a se comprometerem com acordos que reforçam essa transição. A alternativa menos dispendiosa para governos e empresas é criar instrumentos de financiamento para novas tecnologias de antemão, uma vez que os custos previstos para mitigar os efeitos das emissões são maiores do que os de investimento em tecnologias renováveis (CGEE, 2012). Assim, dado os limites ambientais, investir no progresso técnico é a agenda mais otimista para as futuras demandas de energia.

Dentre as alternativas para ampliação da matriz energética, as pilhas a combustível ganham um relativo destaque, sendo os dispositivos eletroquímicos mais eficientes de que se tem conhecimento. Essas pilhas convertem a energia química de combustíveis (tais como hidrogênio, gás natural, etanol) em elétrica, com alta eficiência. Seu princípio de funcionamento é bastante semelhante ao de uma pilha convencional, porém nessas o fornecimento de energia é contínuo, desde que haja alimentação ininterrupta com combustível (FLORIO *ET AL.*, 2004).

Embora a primeira investigação relacionada a essa tecnologia date de 1800, os princípios de funcionamento da pilha a combustível foram estabelecidos apenas no final da década de 1830 (ANDÚJAR & SEGURA, 2009). Através desta descoberta, seis tipos diferentes de pilhas a combustível foram desenvolvidos ao longo de quase dois séculos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Tipos de pilhas a combustível.

Tipo de Pilha	Temperatura de Operação	Aplicações e Comentários
Célula a Combustível Alcalina	50-200°C	Usado em ônibus espaciais
Célula a Combustível de Membrana Polimérica	30-100°C	Veículos e aplicações móveis, além de sistemas de cogeração de baixa potência
Célula a Combustível de Metanol Direto	20-90°C	Recomendado para Sistemas eletrônicos portáteis de baixa potência
Célula a Combustível de Ácido Fosfórico	~220°C	Muito utilizado em sistemas de cogeração de 200 kW
Célula a Combustível de Carbonato Fundido	~650°C	Recomendado para Sistemas de cogeração de média a larga escala, da ordem de MW
Célula a Combustível de Óxido Sólido	500-1000°C	Recomendado para sistemas de cogeração de pequeno, médio e grande porte, de 2 kW a vários MW

II. Pilha a Combustível de Óxido Sólido

Dentre os diferentes tipos de pilhas a combustível existentes, merecem destaque as pilhas a combustível de óxido sólido, as PaCOS ou do inglês SOFC. Produzidas majoritariamente a partir de materiais cerâmicos, estas pilhas encontram aplicações nos mais diversos setores, desde os sistemas de propulsão dos futuros ônibus espaciais americanos até o fornecimento de energia e calor a moradias ao redor do mundo. Os benefícios da utilização desses dispositivos são diversos, tais como geração de energia distribuída permitindo o acesso em áreas remotas, pouco ruído, baixo ou nenhum resíduo poluente dependendo do combustível, utilização de diversos tipos de combustíveis, inclusive os fósseis, permitindo uma transição gradual para uma economia voltada para o hidrogênio e produção de energia com alta confiabilidade.

As PaCOS são compostas por dois eletrodos (um positivo e outro negativo) separados fisicamente por um eletrólito. O combustível sofre oxidação no anodo (eletrodo combustível), polo negativo da célula, enquanto que o material oxidante (geralmente o oxigênio do ar) sofre redução no catodo, polo positivo. O eletrólito se encontra entre as duas camadas de eletrodo, garantido que apenas íons de O^{2-} passem do cátodo para o anodo. Os elétrons formados no anodo transitam para o catodo através de um circuito externo, responsável pela geração de energia. Este funcionamento está esquematizado conforme a Figura 1.
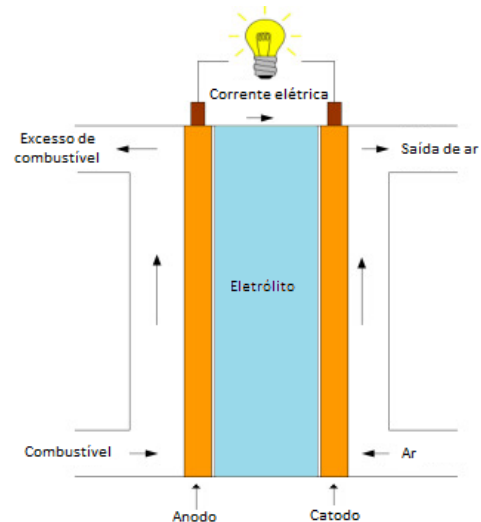
Figura 1: Esquema geral de uma célula a combustível. Adaptado de: (PACHAURI & CHAURAN, 2015).

Cada unidade da pilha é composta por estas três partes (anodo, catodo e eletrólito). O empilhamento de várias pilhas (interconectadas por uma placa cerâmica ou metálica) resulta num sistema de geração de energia modulável de acordo com a quantidade de pilhas conectadas. Além da energia elétrica o empilhamento permite a utilização do calor proveniente da reação eletroquímica global exotérmica.

Entretanto, a implementação dessas tecnologias apresenta desafios tecnológicos, por ainda precisarem de pesquisa e desenvolvimento; políticos, uma vez que dependem de políticas públicas alinhadas e comprometidas com seus desenvolvimento e implementação e; comerciais, devido ao seu alto custo e dificuldade de inserção no mercado. Esses desafios são intrínsecos a produtos que combinam tecnologias complexas e inovações radicais e, suas soluções, revelam seu potencial para auxiliar no desenvolvimento econômico, social e ambiental.

A. *O caminho desta tecnologia*

Apesar de a primeira PaCOS ter sido desenvolvida em 1937, a comercialização desses dispositivos até hoje encontra dificuldades de penetração no mercado, especialmente devido a complexidades tecnológicas (tais como a temperatura de funcionamento) e alto custo de produção. Sendo assim, vários governos apoiaram o desenvolvimento e comercialização dessas tecnologias, principalmente após a virada do milênio. A seguir, vamos apresentar alguns dos programas já realizados na Europa, Estados Unidos, Japão e, por fim, no Brasil.

B. *Europa*

Os países europeus contribuem com a pesquisa e desenvolvimento das tecnologias de hidrogênio desde sua criação, sendo o locus onde tudo nasceu. No início dos anos 1980, a Comunidade Econômica Europeia criou um novo instrumento de financiamento à pesquisa e inovação, denominado *Framework Programme for Research and Technological Development* (mais conhecidos como FP1, FP2 e assim por diante) dirigindo recursos a áreas de pesquisas consideradas estratégicas para a comunidade. Em 2002 (já com a União

Europeia), as tecnologias de hidrogênio entraram no programa FP6 (2002-2006) motivadas por profundos impasses geopolíticos, ambientais e sociais relativos ao fornecimento de energia na Europa que poderiam ameaçar o crescimento econômico da região. O foco foi reduzir custos, melhorar desempenho, durabilidade e segurança de sistemas estacionários e veiculares para que as tecnologias de hidrogênio se tornassem competitivas com as já existentes no mercado. Neste primeiro momento, previa-se a comercialização em 2020 (EUROPEAN COMMISSION, 2006).

Em uma segunda fase, o FP7 (2007-2013) recebeu novamente recursos voltados para pesquisa e desenvolvimento de pilhas a combustível, desta vez, sob uma coordenação público-privada própria (denominada *Fuel Cells & Hydrogen*) vinculada ao programa. Durante este programa, mais de 185 instituições receberam incentivos financeiros, com 155 projetos totalizados em €450 milhões (EUROPEAN COMMISSION, 2006). Alguns dados destes programas são fornecidos na Tabela 2.

Tabela 2: Alocação dos investimentos feitos através dos programas FP6 e FP7.

Área	FP6	FP7
Transportes, reforma e infraestrutura	19,3%	37%
Geração estacionária	8%	34%
Produção e distribuição de hidrogênio	19,3%	13%
Armazenamento de hidrogênio	8,1%	-
Pesquisa básica célula combustível (baixa e alta temperatura)	14,6%	-
Regulamentos de segurança códigos e padrões	4,9%	-
Caminhos e análise socioeconômica	8,8%	-
Validação e demonstração	16,8%	-
Mercados	-	12%
Atividades *Cross-cutting*	-	4%

É importante observar que as aplicações para transporte receberam, nos dois programas, a maior quantidade de recursos. Já a geração de energia estacionária (muito explorada pelos países asiáticos) ganhou relevância nos últimos anos, fazendo com que o investimento nesta área atingisse patamares semelhantes ao de transporte.

C. Os Estados Unidos

As pilhas a combustível nos Estados Unidos foram inicialmente desenvolvidas pós-Segunda Guerra Mundial durante a corrida espacial promovida pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). A importância dos programas da NASA foi além das fronteiras americanas, despertando o interesse para as tecnologias de hidrogênio principalmente após anunciar seu uso em voos espaciais. Em 1961, os sistemas de pilhas a combustível foram as tecnologias mais promissoras para alcançar o desafio de expedições extraterrestres uma vez que apresentavam propriedades convenientes, tais como eficiência, peso, confiabilidade e fornecimento de água potável.

Outros departamentos do governo americano atuaram no desenvolvimento das pilhas a combustível, sendo o departamento de Energia o principal. Em 1999, o departamento criou a Aliança *Solid State* Conversão de Energia (SECA) visando reduzir o custo de produção das pilhas, utilizando combustíveis fósseis. Foram selecionadas empresas que apresentavam vantagens tecnológicas para desenvolver, projetar e fabricar a célula para compor o que foi chamado de "Equipes Industriais". Além disso, o governo criou o "Núcleo de Tecnologia" composto por universidades, institutos de pesquisa e laboratórios governamentais para realizar pesquisa aplicada. Assim, o programa funcionava com os "Núcleos de Tecnologia" transferindo a sua tecnologia para que as "Equipes Industriais" desenvolvessem e comercializassem os sistemas a hidrogênio. De 2002 a 2011, o foco do programa foi reduzir a degradação da célula e seu custo de produção (800-400 dólares por kWh). Nos anos de 2011-2015 foram realizados prova de conceito e, atualmente, a perspectiva é de implantar demonstração de sistemas integrados.

D. O Japão

O Japão é o líder mundial em desenvolvimento e comercialização de tecnologias de hidrogênio, inclusive as de óxido sólido. Na década de 1980 o governo criou o *New Energy Development Organization* (NEDO) com o objetivo de "intervir em problemas ambientais e relativos à energia, e aprimorar a tecnologia industrial" (NEDO, 2015). As preocupações ambientais e a alta dependência energética são as principais justificativas para o pioneirismo japonês. Desde 1974, com o *Sunshine Project* o governo já sinalizava sua disposição em apostar em alternativas energéticas que pudessem atender as demandas de crescimento econômico japonês de forma sustentável.

Apesar do expressivo financiamento para a comercialização das pilhas a combustível, a tecnologia só prosperou devido ao sucesso de longos anos de investimentos (1992-2000) em pesquisa básica e desenvolvimento. Foi esta persistência que permitiu o desenvolvimento de um sistema de cogeração de pequena escala até 2004. Nos quatro anos seguintes, iniciou-se uma demonstração em grande escala, testando os protótipos anteriores e ampliando as perspectivas de mercado. Até 2009, ocorreram demonstrações em larga escala e em seguida, criou-se uma marca para a comercialização de tecnologias de hidrogênio via consórcio, a ENE-Farm. Em 2012 criou-se a ENE-Farm Tipo S, resultado de décadas de P&D em PaCOS voltados para aplicação residencial. A ENE-Farm S foi constituída por um grupo de grandes empresas japonesas que co-desenvolveram o sistema completo aproveitando suas expertises.

E. O Brasil

O Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), desde 1995, promove ações voltadas para o estímulo da produção de Pilhas a Combustível no Brasil. A partir da criação dos Fun-

dos Setoriais em 2001, o Ministério destina recursos mais expressivos ao setor de energia no Brasil. Com isso, nasceram as parcerias privadas, internacionais e também com o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior viabilizando um projeto voltado para a reforma de etanol para produção de hidrogênio.

O ano de 2001 foi marcado por uma drástica crise energética, denominada a “crise do apagão”, propulsada especialmente pela falta de planejamento do setor energético brasileiro, pela dependência da hidroeletricidade, pelo baixo investimento em transmissão de energia e pelos baixos índices de chuvas. Os prejuízos dos cortes de energia elétrica neste mesmo ano contabilizados pelo Tribunal de Contas da União chegaram a R$ 45,2 bilhões e evidenciaram a necessidade de maiores investimentos em fontes de energia alternativas no país.

Os primeiros indícios de uma mudança da conduta por parte do governo brasileiro perante a situação ocorreu em 2002. Desenvolver Pilhas a Combustível foi uma das propostas do Ministério de Ciência e Tecnologia. Nesta época, ele acentuou esforços para identificar competências tecnológicas desta tecnologia nos estados de Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro e São Paulo e ainda em 2002 criou o Programa Brasileiro de Sistemas de Células a combustível (Figura 2), “permitindo ações integradas e colaborativas, para o desenvolvimento da tecnologia nacional de células a combustível. ” (TAROCO *ET AL.*, 2009).
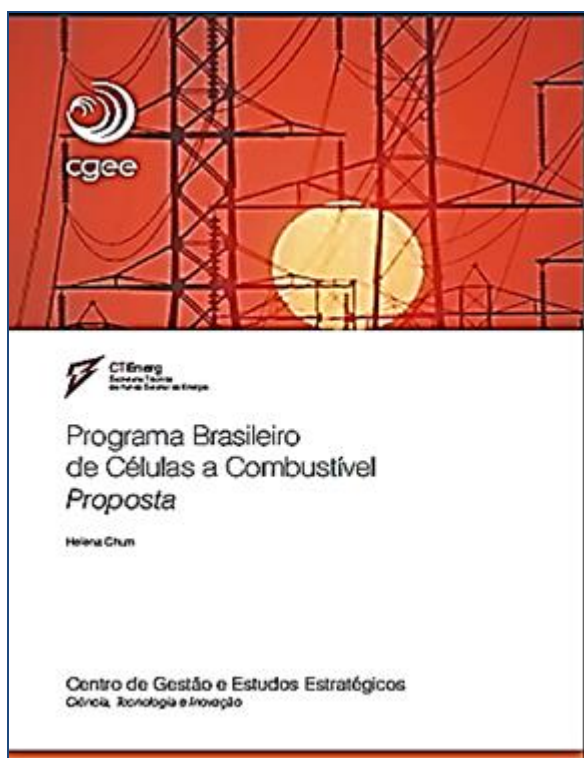
Figura 2: O Programa Brasileiro de Células a Combustível

A criação da Rede PaCOS, específica para pilhas de óxido sólido, também data próxima a esta época, estabelecendo uma parceria entre dez grupos de pesquisa de universidades brasileiras capacitados cientificamente para assessorar e executar conjuntamente o desenvolvimento da célula.

O caso específico da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com seu grupo de pesquisadores de PaCOS, também participante da Rede mencionada, merece destaque. Quando o Programa Brasileiro de Sistemas de Células a Combustível foi iniciado, o Departamento de Química da UFMG contava com pesquisadores na área de química de materiais familiarizados com a tecnologia e técnicas próprias utilizadas na fabricação das pilhas. Através da participação no programa, a empresa de energia mineira CEMIG pode conhecer o trabalho desenvolvido pelos químicos. Um primeiro trabalho nasceu da parceria CEMIG&UFMG visando a produção de protótipos e a criação de um Centro de Excelência desta tecnologia no Estado de Minas Gerais. Entre o período de 2004-2009, a CEMIG construiu o Laboratório de Materiais e Pilhas a Combustível no campus universitário, um prédio de aproximadamente 150 m^2 e o equipou com os mais modernos instrumentos para que o grupo pudesse desenvolver suas pesquisas para a criação de um protótipo de 50W de potência. O sucesso dessa interação foi concretizado em julho de 2008, com o primeiro protótipo brasileiro de PaCOS. As ambições para com a tecnologia foram maiores para o segundo projeto (2011-2014): a construção de um protótipo de 1 kW. Em 2014, com o fim do segundo projeto o grupo se tornou uma das referências mundiais em PaCOS devido ao seu grande *know-how*, estabelecendo parcerias (nacionais e internacionais) com universidades e empresas líderes no desenvolvimento da tecnologia.

III. O QUADRO ATUAL E O FUTURO DAS PILHAS A COMBUSTÍVEL

A tecnologia de células a combustível já é uma realidade em muitos mercados mundiais. Incentivos governamentais, colaborações público-privadas e convênios internacionais tiveram papel decisivo na evolução da indústria, especialmente nos territórios americano e asiático.

As inovações e usos das pilhas a combustível são inúmeros, e a seguir mostramos um pouco do que se tem feito e também um pouco do que está por vir.

A. Principais nomes do setor

Diversas empresas mundiais já comercializam sistemas e protótipos baseados na tecnologia de PaCOS. A seguir, na

Tabela 3, fazemos uma compilação de alguns dos principais nomes do setor.

Tabela 3: Principais empresas mundiais atuando na área de PaCOS.

Empresa	País	Configuração/Produto	Potência	Combustível
Aisin Seiki Co™ (http://www.aisin.com)	Japão	PaCOS Sistemas de cogeração para residên-cias	1,3 kW 25 kW	Gás natural
Atrex Energy™ (http://www.atrexenergy.com)	EUA	PaCOS tubular Protótipos Aplicações militares	250, 500, 1000, e 1500 W	Gás natu-ral/propano
Bloom Energy™ (http://www.bloomenergy.com)	EUA	PaCOS Sistemas de geração estacio-nária	50, 200, 250 kW	Gás natu-ral/biogás
CeresPower™ (http://cerespower.com)	Reino Uni-do	PaCOS Sistemas de geração estacionária		
Fuel Cell Energy™ (http://www.fuelcellenergy.com)	EUA	Pesquisa em PaCOS para aplicações portáteis/militares		
Mitsubishi Hitashi Power Sys-tems™ (https://www.mpshq.com)	Japão	PaCOS Pesquisa em sistemas de cogeração		
Protonex™ (https://protonex.com)	EUA	PaCOS Portáteis para aplicações militares		
Redox Power Systems™ (http://www.redoxenergy.com)	EUA	PaCOS Sistemas para cogeração em residências	25 kW	Gás natural
Rolls Royce™ (http://www.rolls-royce.com)	Reino Uni-do	PaCOS		
Solid Power™ (http://www.solidpower.com)	Itália	PaCOS Sistemas de geração estacionária	13 kW, 2000 kW	Gás natural e biometano
Sunfire GmbH™ (http://www.sunfire.de)	Alemanha	PaCOS / PaCOS reversível Geração estacionária e portátil; gera-ção de hidrogênio	750 W, 1,3 kW	Gás natural, biogás, GLP, etanol, metanol

B. Geração estacionária de energia

O setor de fornecimento estacionário de energia, Figura 3, é hoje aquele de maior participação no mercado global de pilhas a combustível. Suas aplicações variam em diversas escalas, desde o fornecimento combinado de calor e energia (cogeração) às residências, até o fornecimento a grandes plantas industriais e vilarejos (FUELCELLTODAY, 2013).

Figura 3: Esquema de uma PaCOS em aplicações estacionárias.

De acordo com uma pesquisa da *Navigant Research*™, o mercado de pilhas a combustível para aplicações estacioná-

rias encontra-se em transição para um período de maturidade, em função do crescimento da demanda por energias resilientes e limpas, além de incentivos governamentais, especialmente nos Estados Unidos e Japão (NAVIGANT RESEARCH, 2016). Cerca de 100 MW foram instalados nos Estados Unidos somente no ano de 2014, e estima-se que a indústria de pilhas a combustível estacionárias no país se torne um mercado de mais de 6 bilhões de dólares em 2020 (WANG, 2015).

Com posição de destaque no mercado de geração estacionária de energia por pilhas a combustível, a americana *Bloom Energy*™ surgiu como parte de um grupo de pesquisa dedicado a oferecer soluções em energia para o programa *Mars* da NASA. O grupo emprega a tecnologia de PaCOS no fabrico de servidores de energia, Figura 4, capazes de eletrizar grandes edifícios e empresas (HARDMAN *ET AL.*, 2015). A célula desenvolvida pelo grupo é composta por materiais já tradicionais da área, aliados a um design sofisticado de componentes de resfriamento (JEROEN *ET AL.*, 2007).

Desde a sua criação, a *Bloom Energy*™ (anteriormente *Ion American Corp*) conquistou uma clientela vasta e respeitável, com projetos implantados em empresas como Google™, Coca-Cola™ e FedEx™. Em agosto de 2016 a organização fechou um contrato com a sueca IKEA™ para instalação de quatro plantas de geração, totalizando 1MW. A Bloom Energy™ conta hoje com 200 projetos, distribuídos entre Estados Unidos e Japão (FUEL CELLS BULLETIN, 2016).

Figura 4: Servidores de energia da Bloom Energy™. Fonte: (CLANCY, 2015).

Microssistemas de geração combinada de calor e energia, especialmente para moradias, são outra grande aplicação das PaCOS. Na Europa, o consórcio SOFT-PACT foi criado em 2011 com o intuito de aplicar a tecnologia de pilhas a combustível à sistemas de energia e aquecimento de residências e demonstrar, ultimamente, sua viabilidade e eficiência. O programa, em parceria com a australiana *Ceramics Fuel Cell Limited*™, completou a instalação de mais de 25 sistemas integrados de pilhas a combustível, Figura 5, no Reino Unido e Alemanha (FUEL CELLS BULLETIN, 2014).

Figura 5: Módulo desenvolvido pela *Ceramics Fuel Cell Limited* ™ e empregado no consórcio SOFT-PACT. Fonte: (IPOWER, 2013).

O fornecimento de energia a pequenas cidades e vilarejos também é possível com a aplicação da tecnologia de pilhas a combustível. A americana Dominovas Energy™ será responsável pela implantação de sistemas modulares de 3 MW, baseados em PaCOS, para fornecer energia à cidade de David na República Democrática do Congo. A empresa também divulgou ser a primeira companhia baseada em pilhas a combustível selecionada para participar no programa *Power Africa*, destinado a acelerar investimentos e garantir o acesso à energia no continente africano (FUEL CELLS BULLETIN, 2015).

C. Transportes

As PaCOS receberam pouca atenção em aplicações ligadas a veículos elétricos, já que se assumia que essa tecnologia, baseada em materiais cerâmicos operando a altas temperaturas, resultaria em materiais frágeis, com baixa densidade elétrica e que precisariam de longos ciclos de resfriamento e aquecimento para seu correto funcionamento (VAN HERLE *ET AL.*, 2000).

No entanto, veículos projetados com base nesse tipo de célula têm sido, mais atualmente, apresentados como os de maior autonomia, eficiência, flexibilidade de combustíveis e menores custos, associados à simplicidade mecânica e volume de componentes (VAN HERLE *ET AL.*, 2000). Apostando nesse cenário promissor, a montadora japonesa Nissan™ está trabalhando no lançamento de um novo veículo baseado em pilhas a combustível a óxido sólido e cujo combustível será o bioetanol. O sistema trará autonomia de cerca de 600 km, similar à dos carros abastecidos com gasolina. Segundo a montadora, os custos relacionados ao projeto serão próximos daqueles necessários ao desenvolvimento de carros elétricos. O uso de bioetanol trará diversas vantagens, como rapidez de reabastecimento, grande disponibilidade de combustível com infraestrutura já existente (especialmente nos Estados Unidos e América do Sul), além de resultar em um ciclo neutro de emissões de carbono (FUEL CELLS BULLETIN, 2016).

No território europeu, a empresa CeresPower™ recentemente recebeu fundos do governo britânico para o desenvolvimento de módulos de PaCOS com o intuito de estender a autonomia de veículos elétricos comerciais leves (como vans, por exemplo). O projeto também conta com a parceria

da companhia automotiva Nissan™, Figura 6. Antes de 2016, a CeresPower™ também firmou uma parceria com a coreana Honda™ para o desenvolvimento de PaCOS de temperatura intermediária para aplicações em diversos equipamentos elétricos (FUEL CELLS BULLETIN, 2016).

Figura 6: Veículo a PaCOS da Nissan. Fonte: (NISSAN, 2016).

Além das aplicações terrestres, PaCOS também podem ser aplicadas a transportes marítimos, Figura 7. A grande vantagem aqui está na reduzida emissão de poluentes além do aumento considerável em eficiência. O projeto SchIBZ do governo alemão, em parceria com a Sunfire GmbH™ e a ThyssenKrupp Marine Systems™, demonstrou a viabilidade do uso de PaCOS como fontes principais de energia em navios (FUEL CELLS BULLETIN, 2015).

Figura 7: Sistema desenvolvido pela Sunfire GmbH™ para aplicações em transportes marítimos. Fonte: (SUNFIRE, 2015).

D. *Aeroespacial*

Nos últimos anos, em vista dos apelos mundiais em relação à sustentabilidade, percebeu-se um esforço geral por parte do setor aeronáutico no sentido de produzir aeronaves menos poluentes (VENTURI, 2013). Nesse ínterim, o uso de pilhas a combustível surge como uma alternativa aos tradicionais motores a combustão interna, levando a uma maior eficiência e a baixos índices de emissões.

A montadora de aeronaves Boeing™ está apostando no uso de pilhas a combustível reversíveis de óxido sólido como uma alternativa para o armazenamento de energia de modo eficiente e por longos períodos de tempo. A célula será desenvolvida pela empresa alemã Sunfire GmbH™, e se baseia no armazenamento de hidrogênio, proveniente da conversão de energia renovável (i.e. energia solar), em tanques de alta pressão. Quando a energia for necessária, a célula passa a operar no modo célula a combustível, consumindo o hidrogênio e fornecendo energia (FUEL CELLS BULLETIN, 2016).

A agência espacial americana NASA investe na tecnologia de pilhas a combustível desde a década de 1960 (VENTURI, 2013) e recentemente firmou contrato com a americana Nexceris™ (antiga NexTech Materials™), para o desenvolvimento de PaCOS para uso em suas futuras missões espaciais. A célula deverá operar com uma mistura de metano líquido e oxigênio, e entregará energia de alta densidade e eficiência, visando atender aos altos requisitos de desempenho necessários as aplicações aeroespaciais. As pilhas deverão ser utilizadas futuramente em veículos de exploração, sondas lunares e possivelmente para a geração de energia na Lua e em Marte. A tecnologia de alta eficiência que será desenvolvida também poderá encontrar aplicações em meios militares, como a utilização em aeronaves, Figura 8, e submarinos não tripulados (FUEL CELLS BULLETIN, 2015).

Figura 8: Sistemas de energia baseados em células de combustível serão projetados para eventual vôo no X-57. Crédito: NASA.

E. *Portáteis*

O uso de pilhas a combustível para aplicações portáteis é principalmente focado em duas frentes principais. A primeira delas se relaciona ao mercado de geradores portáteis para uso ao ar livre (i.e. acampamentos), moradias não ligadas à rede, fontes de reserva de energia em casos de catástrofes, etc. O segundo mercado é o de equipamentos eletrônicos, como smartphones, laptops, câmeras, drones e qualquer outro equipamento que tradicionalmente seria operado por baterias (WILBERFORCE *ET AL.*, 2016). Dois exemplos de empresas deste setor são a Lilliputian System Inc. (http://www.lilliputiansystemsinc.com), Figura 9, e Ezelleron (http://hellokraftwerk.com).

Figura 9: Fonte USB de energia móvel da Lilliputian System Inc. projetado para fornecer energia a todos os dispositivos eletrônicos de consumo que utilizam butano e uma PaCOS à base de silício.

No mercado de geradores portáteis, a americana Acumentrics PaCOS Corporation™ já entregou mais de 250 sistemas de geração remota pelos Estados Unidos, México e Canadá. O sistema baseado em PaCOS tubulares, utiliza propano e gás natural como combustíveis e produz energia a custos bastante reduzidos em relação aos sistemas convencionais. Os geradores encontram aplicação em telecomunicações, proteção catódica, monitoramento e controle de equipamentos, entre outras (FUEL CELLS BULLETIN, 2015).

O uso de PaCOS em equipamentos eletrônicos ainda é pouco viável, muito em função das altas temperaturas necessárias à operação. No entanto, o desenvolvimento de novos materiais, baseados na tecnologia de filmes finos, pode representar um avanço em direção a esse nicho de mercado. Um novo eletrólito desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Cambridge revelou potencial para revolucionar o suprimento de energia de equipamentos eletrônicos, mostrando altos níveis de desempenho a temperaturas consideravelmente reduzidas (i.e. 300°C). Os pesquisadores agora esperam colaborar com fabricantes de pilhas a combustível para levar a tecnologia ao mercado (FUEL CELLS BULLETIN, 2016).

Com empresas de grande porte envolvidas em seu desenvolvimento, investimentos virtuosos e incentivos governamentais em prol de uma matriz energética sustentável, as PaCOS deverão expandir cada vez mais sua atuação na matriz energética mundial.

E a julgar pelos diversos e bem sucedidos exemplos supracitados, o futuro das pilhas a combustível é o agora.

IV. Considerações Finais

Apesar dos grandes avanços no desenvolvimento das PaCOS, a tecnologia ainda apresenta grandes desafios, sendo o maior deles o seu custo, até então equacionados nos países desenvolvidos através de políticas públicas que possam subsidiar esta comercialização. Este tipo de tecnologia surge como uma alternativa energética no sentido de viabilizar o uso de combustíveis não fósseis e menos poluidores do que os atualmente usados. Percebe-se uma iniciativa mundial crescente na promoção de regulações, por exemplo, para empresas de transporte aéreo, terrestre e mesmo as marítimas para o uso sistemas com menor ruído e menor poluição. Com um mercado cada vez mais global e exigente em termos de sustentabilidade, tem sido uma prática comum entre as empresas se anteciparem para, num futuro próximo, atender às novas regras e não serem excluídas de mercados importantes.

Em termos de aplicações estacionárias, esta tecnologia é ainda mais atrativa, pois proporciona ao usuário uma fonte de energia local, sem os riscos inerentes de interrupções comuns a outras energias dependentes de vento, sol, água, marés. Mesmo que atualmente sejam consideradas tecnologias de alto custo, os ganhos ambientais e os custos decorrentes de uma interrupção de energia são fatores que, se contabilizados no preço final, podem ser bastante favoráveis à implantação das pilhas a combustível. Vale lembrar que nossas ações, mesmo que a nível local, podem ter consequências globais e que a poluição não respeita fronteiras.

V. Referências Bibliográficas

CLANCY, H., 2015. **IKEA Fuels Up With Bloom Energy**. Disponível em: <http://www.forbes.com/sites/heatherclancy/2015/03/26/ikea-fuels-up-with-bloom-energy/#7d5e933965f4>. Acesso em: Set. 2016.

DODDS, P.E. et al. **Hydrogen and fuel cell technologies for heating:** A review, International journal of hydrogen energy 40.5 (2015): 2065-2083.

EUROPEAN COMMISSION, 2006. **European Fuel Cell and Hydrogen Projects 2002-2006.** Office for Official Publications of the European Communities, Belgium.

EUROPEAN COMMISSION, 2007. **European funded research on Hydrogen and Fuel Cells review assessment future outlook.** Office for Official Publications of the European Communities, Belgium.

EUROPEAN COMMISSION, 20016. **FCH JOINT UNDERTAKING PROGRAMME REVIEW REPORT 2015**. Office for Official Publications of the European Communities, Belgium.

FLORIO, D. Z. et al., 2004. **Materiais cerâmicos para pilhas a combustível**. *Cerâmica,* Volume 50, pp. 275-290.

FUEL CELLS BULLENTIN, 2014. **SOFT-PACT installs integrated ful cells in UK**, German homes. *Fuel Cells Bullentin,* 2014(12), p. 5.

FUEL CELLS BULLETIN, 2015. **Acumentrics delivers 250+ SOFC units to remote power users**. *Fuel Cells Bulletin,* 2015(6), p. 5.

FUEL CELLS BULLETIN, 2015. D**ominovas signs MW SOFC deals in Congo, joins Power Africa**. *Fuel Cells Bulletin,* 2015(7), pp. 7-8.

FUEL CELLS BULLETIN, 2015. **NexTech to develop methane/oxygen SOFC unit to NASA**. *Fuel Cells Bulletin,* 2015(7), pp. 10-11.

FUEL CELLS BULLETIN, 2015. **Sunfire 50 kW SOFC for ship-integrated fuel cell project in Germany**. *Fuel Cells Bulletin,* 2015(11), pp. 3-4.

FUEL CELLS BULLETIN, 2016. **IKEA orders Bloom SOFC for four more California stores.** *Fuel Cells Bulletin,* 2016(8), p. 4.

FUEL CELLS BULLETIN, 2016. **Nissan SOFC powered vehicle system runs on bioethanol.** *Fuel Cells Bulletin,* 2016(7), pp. 2-3.

FUEL CELLS BULLETIN, 2016. **Sunfire supplies Boeing with largest reversible solid oxide electrolyser/fuel cell system.** *Fuel Cells Bulletin,* 2016(2), p. 1.

FUEL CELLS BULLETIN, 2016. **Thin-film SOFC electrolyte has portable power potential.** *Fuel Cells Bulletin,* 2016(1), p. 15.

FUEL CELLS BULLETIN, 2016. **UK funding for Ceres SOFC range-extender, PEM electrode R&D.** *Fuel Cells Bulletin,* 2016(4), pp. 3-4.

FUELCELLTODAY, 2013. *The Fuel Cell Industry Review - 2013,* s.l.: s.n.

HARDMAN, S., CHANDAN, A. & STEINBERGER-WILCKENS, R., 2015. **Fuel cell added value for early market applications.** Journal of Power Sources , Volume 287, pp. 297-306.

HASHIMOTO, M. **Japan's Hydrogen Policy and Fuel Cells Development.** In: NEDO, (2015).

IPOWER, 2013. **BlueGEN Micro-CHP.** Disponível em: <http://ipoweruk.com/bluegen/>. Acesso em: Set. 2016.

JEROEN, V. et al., 2007. **Intergrated Solid Oxide Fuel Cell And Fuel Processor.** Estados Unidos da América, Patente Nº US 20070196704 A1.

NAVIGANT RESEARCH, 2016. **Stationary Fuel Cells.** Disponível em: <http://www.navigantresearch.com/research/stationary-fuel-cells>. Acesso em: 29 Set. 2016.

NEDO, **Japan's Hydrogen Policy and Fuel Cells Development** in NEDO, NEDO (2015).

NEDO. Activities of NEDO for practical use of stationary fuel cell systems. **4th IPHE Workshop - Tokyo International Forum.** Tokyo, Japan. 01 (2011) (3).

NISSAN, 2016. **Nissan unveils world's first Solid-Oxide Fuel Cell vehicle**. Disponível em: <http://nissannews.com/en-US/nissan/usa/channels/us-united-states-nissan/releases/nissan-unveils-world-s-first-solid-oxide-fuel-cell-vehicle/photos>. Acesso em: set. 2016.

PACHAURI, R. K. & CHAURAN, Y. K., 2015. **A study, analysis and power management schemes for fuel cells.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 43, pp. 1301-1319.

SUNFIRE, 2015. **Sunfire suppies Thyssenkrupp marine systems with 50 kW SOFC.** Disponível em: <file:///C:/Users/HP%20note/Downloads/2015_Jul_Sunfire_supplies_ThyssenKrupp_Marine_Systems.pdf >. Acesso em: 2016.

U. S. DEPARTMENT OF ENERGY, NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY, THE SOLID STATE ENERGY CONVERSION ALLIANCE SECA. **A US Department of Energy Initiative to Promote the Development of Mass Customized Solid Oxide Fuel Cells for Low-Cost Power**. 7th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells, (6) (2001).

VAN HERLE, J. et al., 2000. **Concept and technology of SOFC for electric vehicles.** Solid State Ionics, 132(3-4), pp. 333-342.

VENTURI, R. B., 2013. **Estudo da viabilidade de substituição da APU por célula combustível em aeronave comercial de médio alcanc.** São José dos Campos: s.n.

WANG, U., 2015. **Fuel cell industry charges forward thanks to big corporate customers.** Disponível em: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/jul/31/fuel-cells-big-business-electricity-costs-ikea-microsoft>. Acesso em: Set. 2016.

WARSHAY, M.; PROKOPIUS, P.R.. **The fuel cell in space:** yesterday, today and tomorrow, Grove Anniversary Fuel Cell Symposium (1989).

WILBERFORCE, T. et al. 2016. Advances in stationary and portable fuel cell. **International Journal of Hydrogen Energy,** Volume 41, pp. 16509-16522.

WORLD ENERGY COUNCIL (WEC). **World Energy Resources 2013.** Survey, (2013).

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future**, Oxford: Oxford University Press (1987).

VI. COPYRIGHT

Estimativa da Radiação Solar Global em Minas Gerais Através de Dados de Satélites

Ruibran Januário dos Reis, Daniel Pereira Guimarães, Chiguero Tiba, Viviane Augusta Pascoal

***Resumo* – Informações adequadas sobre os recursos solares são importantes para uma variedade de áreas tecnológicas, tais como: agricultura, meteorologia, engenharia florestal, recursos hídricos e, principalmente, para uma tecnologia inovadora, como a energia solar. No processo de uma tecnologia inovadora, a entrada no mercado, a reprodução alargada e sustentada depende fortemente da economia e confiabilidade dos sistemas instalados. A economia e confiabilidade de um sistema são a consequência de um projeto bem preparado, resultante de um conhecimento exato do recurso solar disponível. O potencial do recurso solar não é apenas necessário, mas, também, um imperativo para uma maior difusão e de aproveitamento da energia solar. As fontes de informação existentes sobre a radiação em Minas Gerais são bastante variadas, tanto a nível institucional e em diferentes tipos de publicações. Esta pesquisa mostra o mapeamento médio da radiação solar global em Minas Gerais a partir de dados de satélites. Os dados calculados através de imagens de satélites forma calibrados com os dados observados na rede de estações meteorológicas do Instituto nacional de Meteorologia – INMET.**

***Palavras-chave* – Radiação solar, Satélites, Sistema de Informações Geográficas.**

I. Introdução

A determinação do potencial energético a partir da radiação solar incidente sobre o território brasileiro é de grande importância para o desenvolvimento de projetos visando o aproveitamento desse recurso natural. A busca por fontes renováveis de energia de baixo impacto ambiental vem impulsionando o desenvolvimento tecnológico e viabilizando economicamente o uso da energia solar (MARTINS & PEREIRA, 2011), tendo em vista a perspectiva de redução futura das fontes tradicionais e as preocupações com o meio ambiente (PEREIRA *ET AL.*, 2006).

O Estado de Minas Gerais já utilizou quase a totalidade dos grandes aproveitamentos hídricos para a geração de eletricidade, restando as opções de importação de energia, o aproveitamento das outras fontes renováveis locais (PCH, eólica e solar) ou a geração termoelétrica convencional com óleo combustível, gás, carvão ou nuclear. Os principais entraves da importação de energia ou da geração termoelétrica convencional e nuclear são: (1) hidroeletricidade da Amazônia com custo de transmissão muito maiores que o da geração, além de problemas ambientais que agregam incertezas aos empreendimentos; (2) combustíveis fósseis, que apresentam preços crescentes, problemas ambientais e subsídios "invisíveis" (externalidades), cada vez mais questionados pela sociedade; (3) no caso da energia nuclear o risco dos acidentes catastróficos. Com a perspectiva da maturidade tecnológica e comercial da energia solar termoelétrica de grande porte na década de 2020, seria apropriado ao sistema elétrico mineiro acompanhar a evolução dessa tecnologia, realizar projetos de pesquisas com inovações de ponta e avaliar detalhadamente o potencial do recurso solar disponível no seu território. Além do seu aspecto renovável e com baixo impacto ambiental, a implantação de centrais termoelétrica solares é importante regionalmente pelos seguintes fatores: (a) permite melhorar o "mix" de geração do setor elétrico brasileiro e portanto aumentar a segurança do sistema elétrico; (b) o recurso solar é mais intenso no período seco da região e portanto tem um caráter complementar ao sistema hidroelétrico regional; (c) é uma geração caracteristicamente distribuída, outro fator de segurança do sistema elétrico; (d) deverá ser instalado em regiões do semi-árido com baixa densidade populacional e terras não competitivas para outros usos mais nobres (agricultura, por exemplo); (e) geração de emprego e rendas. A utilização dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) em energia renovável, começou a ser fortemente realizada a partir da década de 1990, quando passou por um progresso considerável, no qual foram desenvolvidas diversas ferramentas especificas na área (BRAVO, 2002). O Trabalho pioneiro utilizando o SIG para identificação de *Concentrated Solar Power* (CSP), foi desenvolvido por Broesamle *et al.* (2001), em que se analisou a região Norte da África fornecendo um *ranking* de locais em relação ao potencial e custo da eletricidade solar térmica para uma configuração usina particular. Os procedimentos de avaliação e identificação de localidades utilizando SIG estão inovando os mecanismos de tomada de decisão no mundo e contribuindo decisivamente para o rápido crescimento da implantação da tecnologia CSP. Assim, nesse trabalho foi feita a identificação e o mapeamento dos locais mais promissores em Minas Gerais com base somente na estimativa da radiação solar a partir de dados de satélites.

II. Metodologia

No Brasil, apesar das condições climáticas favoráveis, o aproveitamento dessa fonte de energia é muito reduzido. Enquanto 0,9% das residências brasileiras utilizam painéis de aquecimento solar, em Israel, 94% das residências fazem uso dessa tecnologia (CARVALHO, 2010). As dimensões territoriais brasileiras constituem em elemento de dificulda-

Ruibran J. dos Reis é professor da Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial da PUC Minas (e-mail: ruibrandosreis@gmail.com). Chiguero Tiba professor da UFPE (tiba@ufpe.br). Daniel Pereira Guimarães é pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo (daniel.guimaraes@embrapa.br). Viviane Augusta Pascoal é pesquisadora da PUC Minas (vivianeaugustapascoal@hotmail.com).

de para a espacialização da radiação solar no país e o conhecimento do potencial de uso desse recurso energético. O uso de sensores terrestres (radiômetros) é dificultado pelo alto custo de aquisição e manutenção dos equipamentos, perdas de calibração, falhas na coleta das informações e erros ocasionados pela necessidade do uso de processos interpolativos em grandes distâncias. Nesse caso, o uso de sensores orbitais passa a ter grande relevância por permitir um maior detalhamento da variabilidade espacial da radiação solar incidente em grandes áreas, tendo os sensores terrestres a função de validação dos resultados obtidos de modelos. A viabilização dessa tecnologia espacial conduziu a criação, pelo Programa das Nações Unidas para o Ambiente (UNEP), do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) em fase operacional em diferentes países.

Outro modelo físico que utiliza de informações de satélites geoestacionários é o GL 1.2 operado pelo CPTEC[2]. Ambos os modelos utilizam imagens dos satélites meteorológicos GOES (*GeostationaryOperational Environmental Satellite* da Agência Espacial Americana – NASA e operados pelo NOAA - *NationalOceanic&AtmosphericAdministration*). A série de satélites GOES possui órbita geoestacionária, ou seja, mantem sincronia com a rotação da terra de modo a permanecer em posição fixa em relação à superfície de rastreamento e opera desde 1974, mas, as observações mais precisas se deram a partir da terceira geração de satélites representada pelo lançamento do GOES-8. Atualmente o GOES-13, renomeado de GOES-East, monitora o Continente Americano a cada 30 minutos. A próxima geração de satélites meteorológicos geoestacionários, GOES-R, será capaz de triplicar a quantidade de dados coletados, quadruplicar a resolução das imagens e fazer varreduras da atmosfera terrestre a cada 30 segundos e, desse modo, contribuir para a melhoria dos processos de previsão do tempo e monitoramento de fenômenos como furacões, ciclones, tempestades de areia, fumaças de vulcões, nevascas e focos de incêndios. Veja a Figura 10.
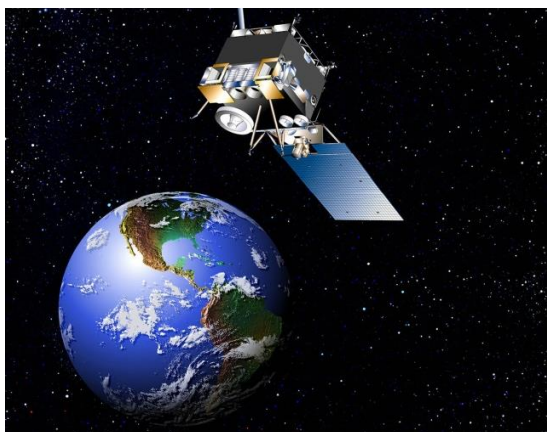
Figura 10 - Satélite GOES – NOAA.

Estudos comparativos entre os mapeamentos gerados pela interpolação de dados obtidos por sensores radiométricos e aqueles gerados pelo modelo de transferência radiativa BRASIL-SR evidenciaram a superioridade das informações obtidas por satélites para a Região Sudeste do Brasil (MARTINS & PEREIRA, 2011). Nessa mesma região, a aplicabilidade do modelo GL 1.2 foi comprovada em comparação com as irradiações coletadas pela rede de Plataformas de Coletas de Dados gerenciada pelo setor de coleta de dados por satélites da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (CEBALLOS & BOTTINO, 2002). Veja Figura 2.
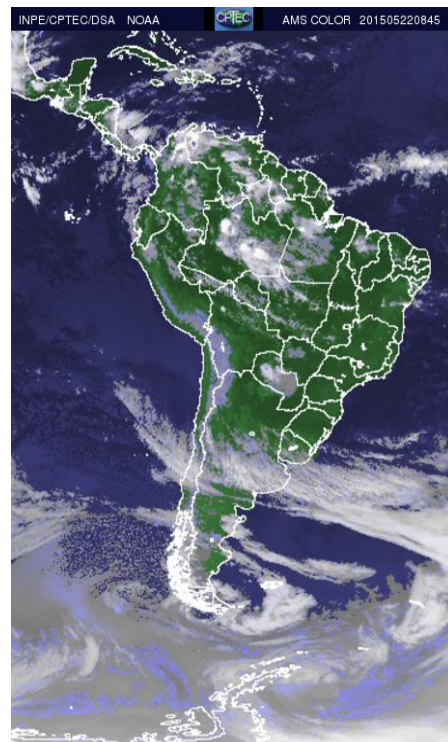
Figura 2 - Imagem Infravermelha da América do Sul – NOAA.

A espacialização da radiação solar sobre o Estado de Minas Gerais teve como base as imagens mensais do Modelo GL 1.2, disponibilizadas pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do CPTEC[3] a partir do ano 2000 em resolução espacial de aproximadamente 4 quilômetros (0,04 *arcdegrees*). As vantagens em relação à espacialização da radiação obtida por estações terrestres estão relacionadas ao maior período das séries históricas (15 anos), melhor variabilidade espacial, ausência de falhas, ausência de erros relacionados à calibração dos instrumentos. As desvantagens se devem aos erros inerentes ao processo de modelagem que não consegue incluir ou explicar integralmente os fatores relacionados à interceptação da radiação pelos elementos presentes na atmosfera. A validação dos resultados foi feita comparando as estimativas satelitais com os dados coletados pelos sensores da rede de estações automáticas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia – Inmet[4] localizados em Minas Gerais e em áreas limítrofes dos estados vizinhos (BA, ES, RJ, SP, GO e DF). A localização geográfica de cada estação automática foi convertida em área de *buffer* circular com 1 km de raio e os vetores resultantes foram usados para a determinação da radiação localizada nas imagens de satélite empregando o *plugin Zonal Statistics* do *software* livre *Quantum Gis*. A Figura 33 mostra a distribuição das estações automáticas usadas para a análise de validação dos resultados.

---

[2] http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/

[3] http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/

[4] http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas
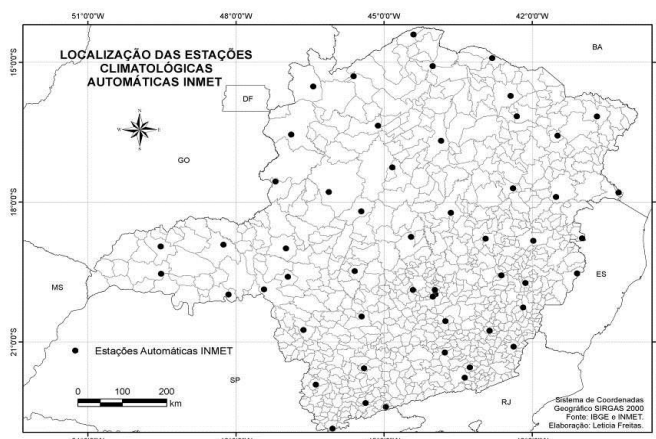
Figura 3 - Distribuição das estações meteorológicas automáticas do INMET em Minas Gerais. Fonte: INMET, 2016.

Para fins comparativos foram usados os dados mensais de radiação das estações do Inmet entre os anos de 2012 e 2015. Antes de determinar a radiação mensal, os dados horários passaram por análise de consistência para eliminar inconsistências e falhas de coleta resultando em 2.200 pontos de controle para fins comparativos com a radiação obtida pelo modelo GL 1.2 do CPTEC. A relação funcional foi estabelecida através de regressão linear simples. Os resultados, apresentados na Figura 4, mostram uma tendência de sobre-estimar as radiações de menores magnitudes ocorrendo o inverso para os valores extremos.
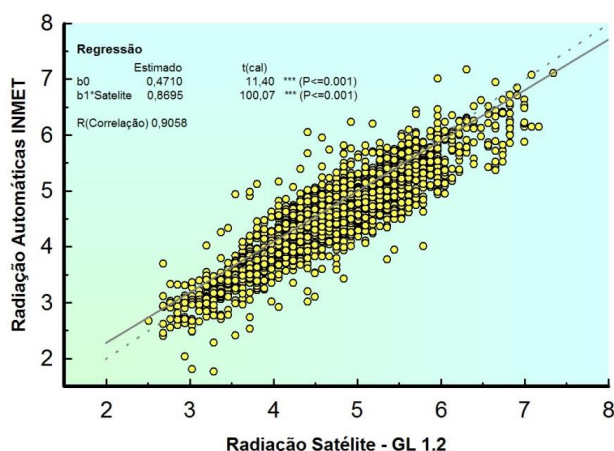
Figura 4 - Comparação entre os dados de radiação solar global do INMET e obtidos por dados de satélites.

A distribuição dos erros, apresentada na Figura 5, mostra que mais da metade das radiações mensais registradas pelas estações automáticas do INMET (52,8%) foram estimadas pelo Modelo GL 1.2 dentro de limites de erro menores que 5% e cerca de 80% dos erros de estimativa foram inferiores ao limite de 10%. Tendo em vista a possibilidade das divergências estarem relacionadas a erros de calibragem ou falta de manutenção dos sensores das estações automáticas do Inmet, optou-se por não proceder à correção dos valores estimados pelo Modelo GL 1.2 em função dos desvios relativos às estações terrestres. Além do mais, a Rede Sonda, operada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, é a única que segue os procedimentos determinados pelo World *Meteorological Organization* (WMO) para a geração da *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) condizente com os padrões de qualidade de aquisição/qualificação e disponibilização dos dados de irradiância solar no Brasil[5].
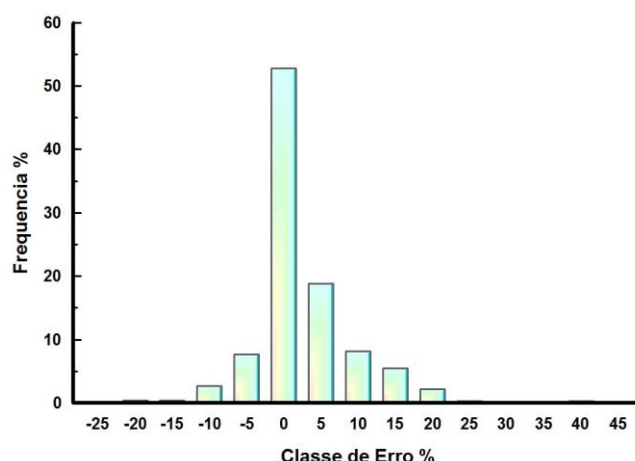
Figura 5 - Distribuição de frequência dos erros percentuais entre a radiação solar estimada pelo Modelo GL 1.2 e os valores obtidos das estações automáticas do INMET.

III. Análise dos Resultados

As cartas de isolinhas de radiação solar global diária média mensal e anual descrevem de forma adequada os dados disponíveis em Minas. Considerando as características das informações existentes, as cartas preparadas constituem o conjunto mais atualizado e de melhor qualidade elaborado sobre o recurso solar em Minas Gerais. As cartas de radiação solar mensal mostram claramente, para cada mês, regiões bem diferenciadas e razoavelmente correlacionadas com as condições pluviométricas e horas de insolação correspondentes.

O mapa da radiação solar global diária média anual elaborado neste projeto mostra que esta grandeza sobre o estado de Minas Gerais varia de 4,5 a 6,5 kWh/m^2. Os valores máximos ocorrem na região Norte de Minas Gerais e os mínimos na região Sudeste, onde se encontram as áreas de maior altitude (Serra do Caparaó e Mantiqueira) e o regime pluviométrico é mais intenso, com totais anuais de precipitação superiores aos 1.400 mm. A massa de ar tropical marítima que atua entre o Brasil e a África é o principal fator climático que inibe a formação de nuvens e, consequentemente, a ocorrência de chuvas nas regiões Norte e Nordeste de Minas Gerais, caracterizadas por um clima semiárido, com precipitações anuais entre 600 e 800 mm e altitudes entre 400 e 600 m.

As cartas de radiação solar global diária média mostram que em Minas Gerais esta grandeza varia entre 3,0 e 7,5 kWh/m².dia, com um período de mínimo no trimestre maio-junho-julho, em que as estações solarimétricas registram uma intensidade de radiação na faixa de 3 a 4 kWh/m².dia. Verifica-se também neste trimestre que o centro de máxima (5 kWh/m².dia) ocorre sobre uma vasta região localizada no Noroeste de Minas Gerais. A tendência de mínima (3 kWh/m².dia) ocorre no Sul e Sudeste do Estado, na região de Caparaó. Já no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro, observa-se que as estações solarimétricas registram intensi-

[5] www.sonda.ccst.inpe.br

dades de radiação muito altas, atingindo um valor máximo de 7,5 kWh/ m².dia. Neste período, ocorre um centro de máxima deste valor numa pequena região do Noroeste de Minas Gerais, ao norte de Januária. Valores menores, mas ainda assim expressivos (muito bons), entre 6,0 e 7,0 kWh/m²/dia, ocorrem numa vasta área localizada acima do paralelo 18 (metade superior do Estado).

Também pode ser deduzido das cartas de isolinhas de radiação solar que os menores índices de nebulosidade (maior índice de radiação solar) se concentram nas regiões Leste e Zona da Mata, onde a circulação marítima deixa o tempo parcialmente nublado em quase todos os dias do ano.

Os mapas sazonais da insolação estão consistentemente correlacionados com a precipitação. No inverno (junho a agosto), quando o índice de precipitação é o menor do ano, o número de horas de brilho solar atinge os valores máximos entre 8,5 a 9,5 horas em uma vasta região da metade oriental do estado de Minas Gerais. De forma inversa, para o período de novembro a janeiro ocorre um máximo anual de precipitação e, portanto, um mínimo de horas de brilho solar, entre 5,0 e 6,0 horas por dia.

Finalmente convém ressaltar os seguintes aspectos importantíssimos para os usuários de informações sobre o recurso solar:

1. Os mapas de distribuição espacial de radiação solar diária média mensal representam apenas uma primeira aproximação do campo de energia solar disponível na superfície (observação espacial macro). Para informações locais deve-se recorrer às médias numéricas das respectivas estações solarimétricas;

2. As isolinhas de insolação diária média mensal e anual têm um caráter totalmente diferente das cartas de radiação solar: são apenas uma imagem gráfica dos dados que constam do banco de dados solarimétricos. Porém, a sua eventual conversão para radiação solar poderia tornar essas isolinhas em valiosa informação complementar dos mapas e banco de dados da radiação solar e;

3. Por fim, a escolha de local para instalar um sistema ou um conjunto de sistemas solares, mediante o uso de mapas de isolinhas do Atlas (porque o valor médio do recurso solar parece adequado), tem um caráter indicativo preliminar que ressalta o potencial da região. Uma escolha definitiva necessitará de medidas detalhadas do recurso no local para determinar seu valor e principalmente a sua variabilidade temporal.
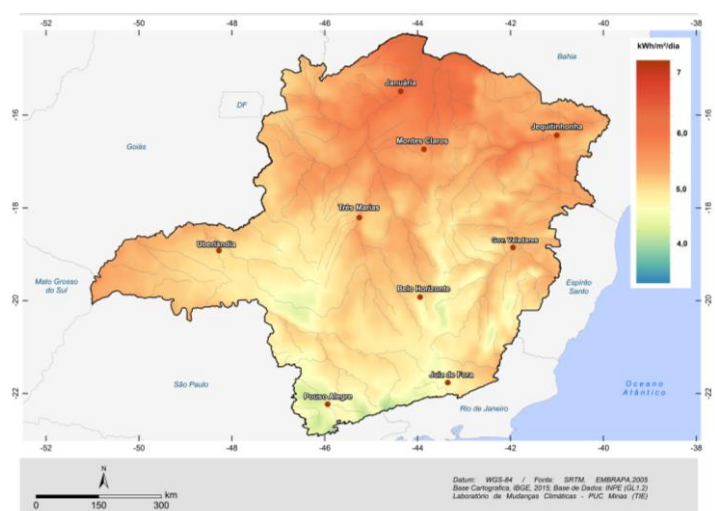
Figura 6 - Radiação solar diária média do mês de janeiro. Fonte: Elaboração própria.
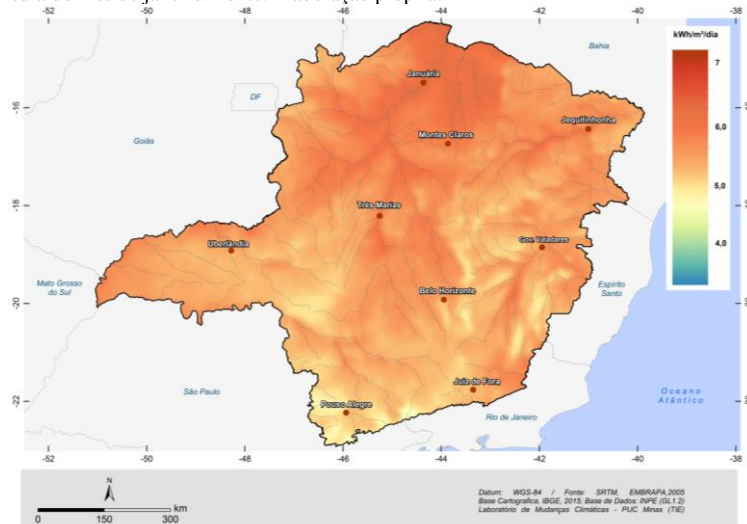
Figura 7 - Radiação solar diária média do mês de fevereiro. Fonte: Elaboração própria.
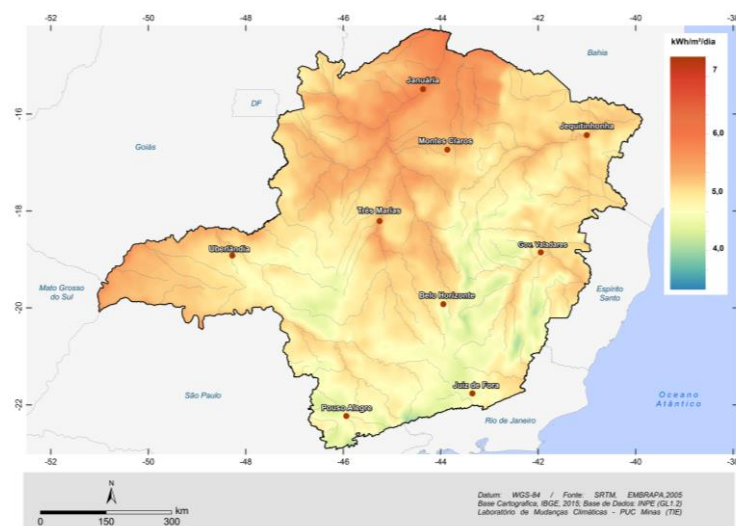
Figura 8 - Radiação solar diária média do mês de março. Fonte: Elaboração própria.
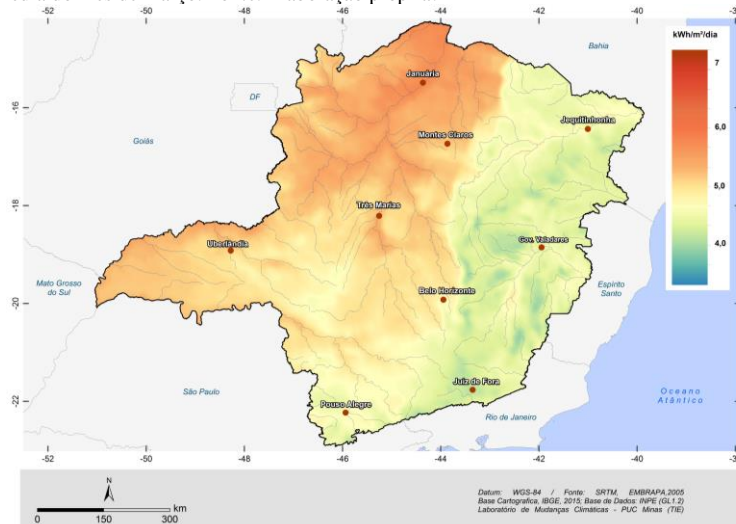
Figura 9 - Radiação solar diária média do mês de abril. Fonte: Elaboração própria.
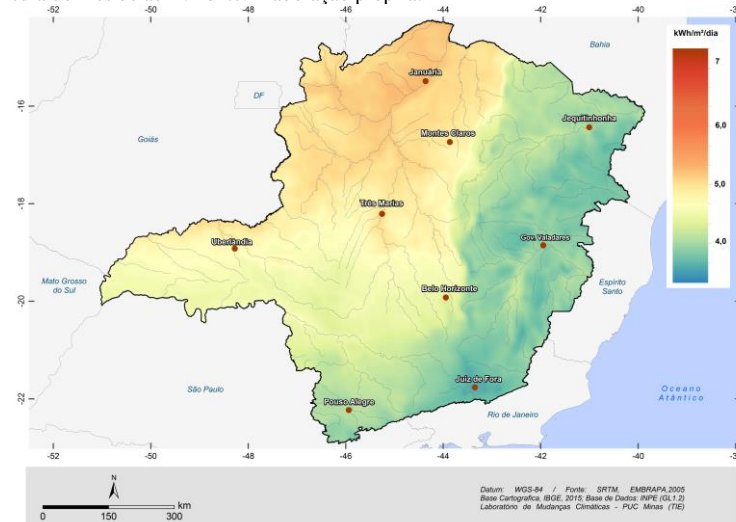
Figura 10 - Radiação solar diária média do mês de maio. Fonte: Elaboração própria.
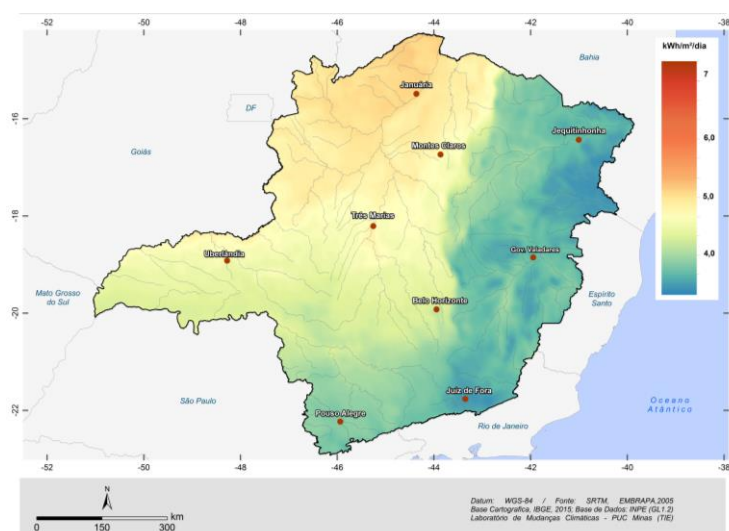
Figura 11 - Radiação solar diária média do mês de junho. Fonte: Elaboração própria.
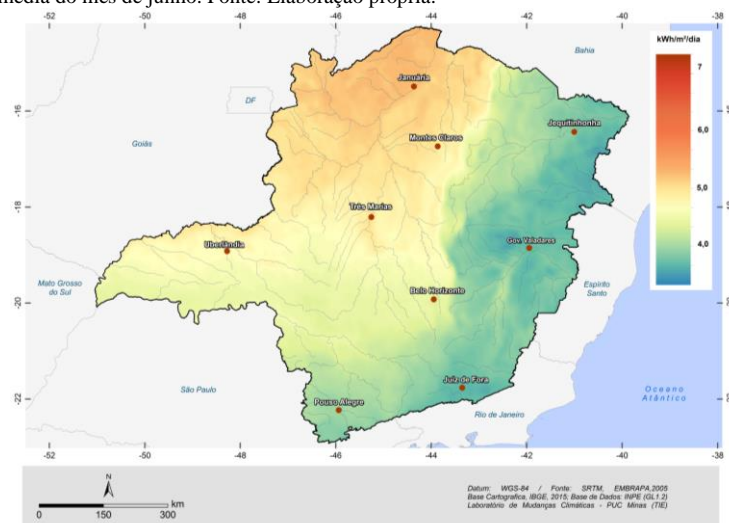
Figura 12 - Radiação solar diária média do mês de julho. Fonte: Elaboração própria.
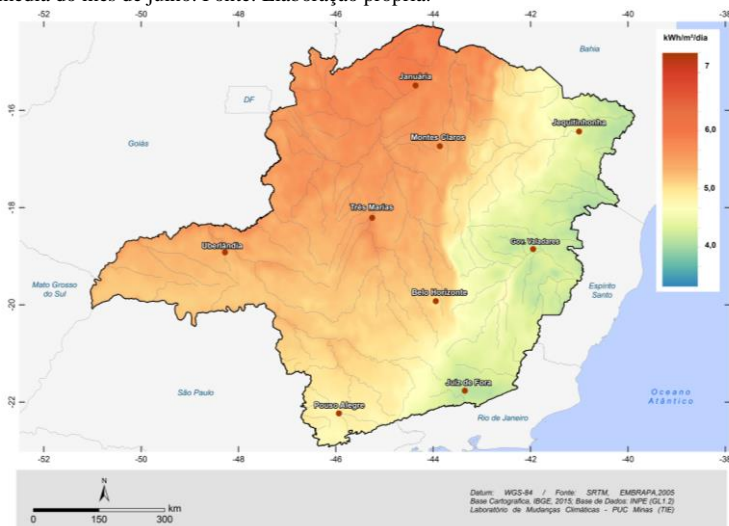
Figura 13 - Radiação solar diária média do mês de agosto. Fonte: Elaboração própria.
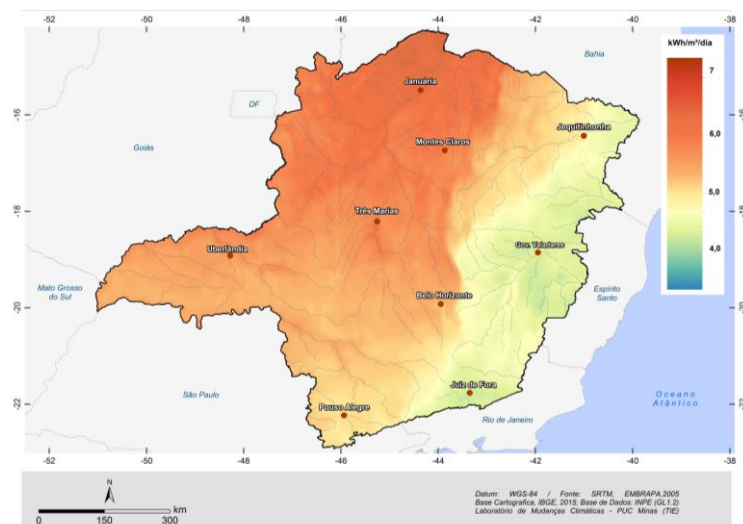
Figura 14 - Radiação solar diária média do mês de setembro. Fonte: Elaboração própria.
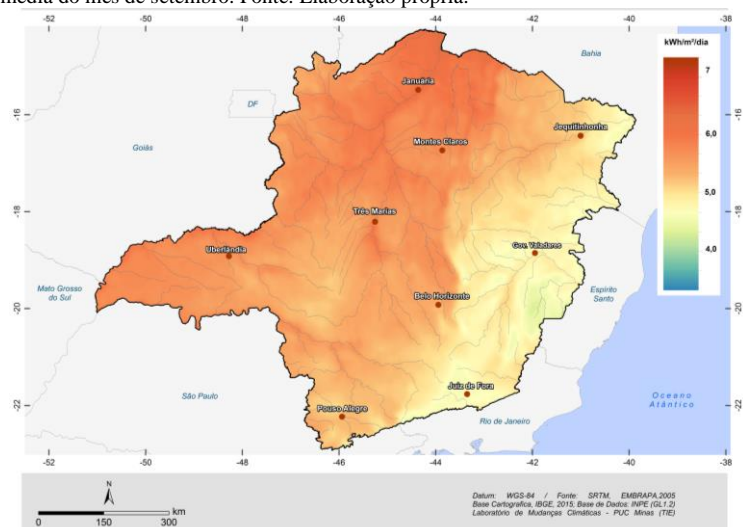
Figura 15 - Radiação solar diária média do mês de outubro. Fonte: Elaboração própria.
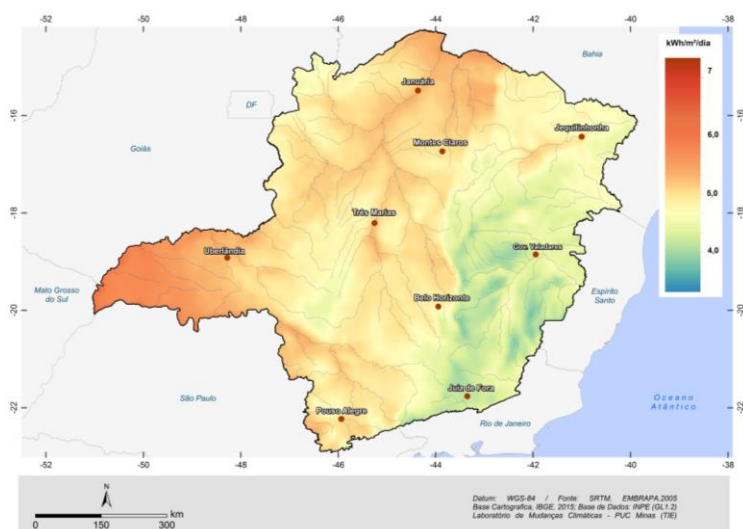
Figura 16 - Radiação solar diária média do mês de novembro. Fonte: Elaboração própria.
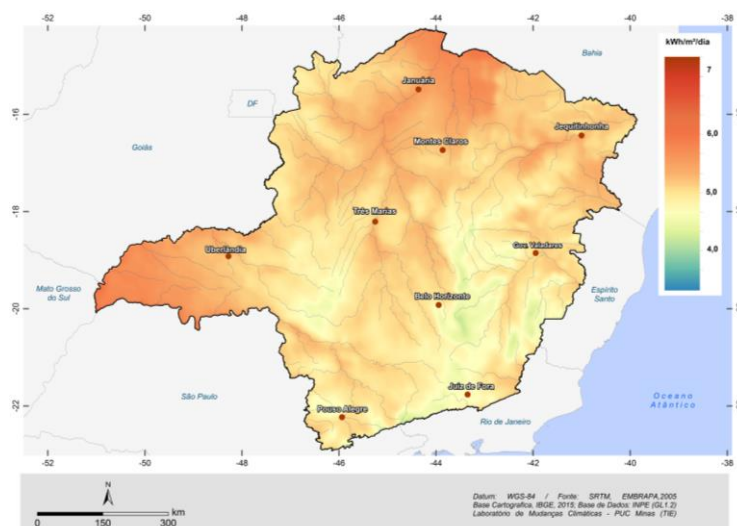
Figura 17 - Radiação solar diária média do mês de dezembro. Fonte: Elaboração própria.
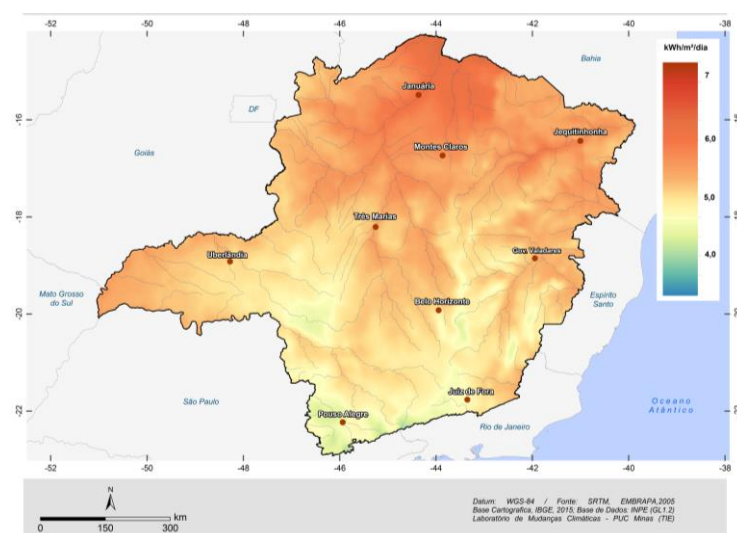
Figura 18 - Radiação solar diária média do anual. Fonte: Elaboração própria.

IV. CONCLUSÕES

Os mapas de radiação solar global diária média mostram que em Minas Gerais esta grandeza varia entre 3,0 e 7,5 kWh/m².dia, com um período de mínimo no trimestre maio-junho-julho, em que as estações solarimétricas registram uma intensidade de radiação na faixa de 3 a 4 kWh/m².dia. Verifica-se também neste trimestre que o centro de máxima (5 kWh/m².dia) ocorre sobre uma vasta região localizada no noroeste de Minas Gerais. A tendência de mínima (3 kWh/m².dia) ocorre no sul e sudeste do Estado, na região de Caparaó. Já no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro, observa-se que as estações solarimétricas registram intensidades de radiação muito altas, atingindo um valor máximo de 7,5 kWh/ m².dia. Neste período, ocorre um centro de máxima deste valor numa pequena região do noroeste de Minas Gerais, ao norte de Januária. Valores menores, mas ainda assim expressivos (muito bons), entre 6,0 e 7,0 kWh/m²/dia, ocorrem numa vasta área localizada acima do paralelo 18 (metade superior do Estado).

Também pode ser deduzido nos mapas de radiação solar que os menores índices de nebulosidade (maior índice de radiação solar) se concentram nas regiões Leste e Zona da Mata, onde a circulação marítima deixa o tempo parcialmente nublado em quase todos os dias do ano.

Os mapas sazonais da insolação estão consistentemente correlacionados com a precipitação. No inverno (junho a agosto), quando o índice de precipitação é o menor do ano, o número de horas de brilho solar atinge os valores máximos entre 8,5 a 9,5 horas em uma vasta região da metade oriental do estado de Minas Gerais. De forma inversa, para o período de novembro a janeiro ocorre um máximo anual de precipitação e, portanto um mínimo de horas de brilho solar, entre 5,0 e 6,0 horas por dia.

Finalmente convém ressaltar os seguintes aspectos relevantes para os usuários de informações sobre o recurso solar:

1. Os mapas de distribuição espacial de radiação solar diária média mensal representam apenas uma primeira aproximação do campo de energia solar disponível na superfície (observação espacial macro). Para informações locais deve-se recorrer às médias numéricas das respectivas estações solarimétricas;

2. As isolinhas de insolação diária média mensal e anual têm um caráter totalmente diferente das cartas de radiação solar: são apenas uma imagem gráfica dos dados que constam do banco de dados solarimétrico. Porém, a sua eventual conversão para radiação solar poderia tornar essas isolinhas em valiosa informação complementar dos mapas e banco de dados da radiação solar e;

3. Por fim, a escolha de local para instalar um sistema ou um conjunto de sistemas solares, mediante o uso de mapas de isolinhas do Atlas (porque o valor médio do recurso solar parece adequado), tem um caráter indicativo preliminar que ressalta o potencial da região. Uma escolha definitiva necessitará de medidas detalhadas do recurso no local para determinar seu valor e principalmente a sua variabilidade temporal.

V. Referências Bibliográficas

BRAVO, J. D. **Los sistemas de información geográfica en la planificación e integración de energías renovables.** Madrid: Editorial CIEMAT, 2002.

BROESAMLE, H.; SCHILLINGS, C.; TRIEB, F. **Assessment of Solar Electricity Potentials in North Africa Based on Satellite Data and a Geographic Information System.** Solar Energy, v. 70, n. 1, p. 1-12, 2001.

CARVALHO, A. R. F. **Evolução do uso de energia solar:** estudo comparativo entre Israel e Brasil. 2010. 65 f. Monografia (Pós-Graduação Lato Sensu em Formas alternativas de Energia)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J. Modelo de estimativa de radiação solar por satélite no CPTEC: Versão GL 1.2. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBMET, 2002. CD-Rom.

PEREIRA, E.B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006, 70 pp.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. INMET. **Estações e Dados Meteorológicos.** Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/>. Acesso em: 03 mai. 2015.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.. Estudo comparativo da confiabilidade de estimativas de irradiação solar para o sudeste brasileiro obtidas a partir de dados de satélite e por interpolação/extrapolação de dados de superfície**. Rev. Bras. Geof.**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 265-276, Junho 2011 .

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Enhancing Information for Solar and Wind Energy Technology Deployment in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 7, p. 4378-4390, 2011.

VI. Copyright

Mapeamento do Potencial de Geração de Energia Utilizando a Cana de Açúcar em Minas Gerais

Ruibran Januário dos Reis, Luciano Sathler dos Reis, Viviane Augusta Pascoal, Lilianne Aparecida Lopes de Oliveira

***Resumo* – A cana de açúcar foi introduzida no Brasil no século XVI, e no século XVII já era o principal produto de exportação do país. O Brasil reúne as melhores condições em relação aos demais países em termos de tecnologia, disponibilidade de recursos naturais, clima e solo para o cultivo da cana, matéria-prima utilizada na fabricação de etanol e açúcar. A produção etanol no Brasil custa a metade do etanol obtido de milho nos Estados Unidos e um terço do mesmo produto de beterraba produzido na Europa. Depois do grande choque do petróleo em 1973, o Brasil voltou a incentivar a produção de cana de açúcar parar geração do etanol. Atualmente, além da produção do açúcar e do etanol, várias indústrias estão gerando energia elétrica com o bagaço da cana. Este trabalho faz o mapeamento do potencial de geração de energia elétrica no Estado de Minas Gerais utilizando cenários de aproveitamento do bagaço da cana de açúcar.**

***Palavras-chave* – Biomassa; Cana de açúcar; Mapeamento.**

I. Introdução

O desenvolvimento e a adoção de tecnologias altamente eficientes para a exploração ótima de fontes renováveis de energia limpa são cruciais para se reduzirem os impactos ambientais, minimizar a quantidade de resíduos secundários e, sobretudo, assegurar a sustentabilidade do suprimento de energia, tendo por base os níveis atuais e futuros das demandas econômicas e sociais. Luz e calor são as duas formas primárias de energia solar, sendo absorvidas e convertidas pelo meio ambiente em formas secundárias. Algumas dessas transformações resultam em fontes de energias renováveis, como biomassa e vento. A crescente conscientização da sociedade acerca dos efeitos deletérios do aquecimento global vem forçando os governos, das principais economias mundiais, a construírem uma agenda comum para se acelerar a substituição das fontes de energia convencionais por fontes renováveis e para a mitigação da emissão de gases efeito-estufa. Em 2013, a participação de energias renováveis na matriz energética brasileira foi da ordem de 41%, comparado a 10%, nos Estados Unidos e, em termos globais, 16% (PEREIRA *ET AL.*, 2012; EPE, 2014; EIA, 2016).

A cana-de-açúcar (*Sccharum offcinarum*) é uma cultura perene, relativamente fácil de ser implantada e manejada, com baixo custo, podendo produzir por 4 ou 6 anos. Para o seu crescimento, a cana necessita de alta disponibilidade de água, temperaturas elevadas e alto índice de radiação solar. A cultura pode ser plantada em três períodos diferentes: sistema de ano-e-meio, sistema de ano e plantio de inverno.

Pode-se concluir que a cana-de-açúcar é hoje a melhor alternativa para a produção de bicombustível. Além da energia química (etanol), a cana diversifica a matriz energética com a produção de energia elétrica e calor a partir do bagaço e dos restos culturais, contribuindo assim, para a redução no uso de energia fóssil e a poluição ambiental (JÚNIOR, 2012).

A cana-de-açúcar pode ser transformada quase que totalmente em energia aproveitável através de processos industriais. Apresenta alto índice de aproveitamento dos subprodutos e baixo impacto ambiental. A cana é capaz de gerar açúcar, álcool anidro (aditivo para a gasolina) e álcool hidratado, além de possibilitar a geração de energia elétrica com a queima do bagaço e a produção de plástico biodegradável, a partir do açúcar.

É importante salientar que o país exerce liderança tanto na produção canavieira quanto nos segmentos da cadeia sucroalcooleira como o açúcar e álcool (JÚNIOR, 2012).

O Brasil possui ao todo 10.472.169 hectares de área plantada com cana-de-açúcar, sendo que a região Centro-Sul representa 89% (9.621.715 hectares) dos hectares de cana plantados (IBGE, 2014). O estado de Minas Gerais teve a segunda maior área de cultivo de cana-de-açúcar do Brasil, correspondendo à 949.801 hectares, ficando atrás somente do estado de São Paulo (IBGE, 2014). Além disso, o estado é o segundo maior produtor de açúcar do país e o terceiro maior produtor de Etanol. O estado é também o terceiro maior exportador de açúcar, e teve um faturamento de 2.396.422 US$ com a safra de 2014/2015 (UNICA, 2015).

Ruibran J. dos Reis é professor da Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial da PUC Minas (e-mail: ruibrandosreis@gmail.com). Luciano Sathler dos Reis é pesquisador da PUC Minas (luciano.arborista@gmail.com). Viviane Augusta Pascoal é pesquisadora da PUC Minas (vivianeaugustapascoal@hotmail.com). Lilianne Aparecida Lopes de Oliveira é pesquisadora da PUC Minas (lilianneaparecida@yahoo.com.br)

O estado de Minas Gerais possui 19 usinas de cana de açúcar com potência de 372.015 kW (ANEEL, 2015).

O objetivo deste trabalho é apresentar o potencial de geração de energia em Minas Gerais a partir da utilização da cana de açúcar.

II. Histórico da Cana de Açúcar no Brasil

Alguns pesquisadores acreditam que o país de origem da espécie *Saccharum officinarum* (cana-de-açúcar) foi a Índia. Outros pesquisadores citam a Melanésia, localizada na Oceania como a origem da planta. Segunda consta, a população da região da Nova Guiné e das Ilhas Fidgi, situadas no Pacífico Sul, foi a primeira a desfrutar de uma espécie primitiva, denominada Othite (SIAMIG, 2015).

A cana-de-açúcar foi domesticada e disseminada por todo o sudeste asiático, as ilhas de Papua em Nova Guiné e Java na Indonésia tornaram-se centro de diversidades, onde a maior parte das espécies foi coletada a partir do final de 1800 (CONSELHO DE INFORMAÇÕES SOBRE BIOTECNOLOGIA, 2015).

Os árabes introduziram o consumo de cana-de-açúcar no Egito, durante o século X e através do Mar Mediterrâneo introduziram em Chipre, na Sicília e na Espanha. Credita-se aos egípcios o desenvolvimento do processo de clarificação do caldo de cana e um açúcar de alta qualidade para a época. Na Europa o açúcar era consumido por reis e nobres, que o adquiriam de mercadores monopolistas, que mantinham relações comerciais com o Oriente (UDOP, 2012).

Devido a sua posição geográfica, Portugal era passagem obrigatória para as naus carregadas de mercadorias. Isso estimulou a produção de cana-de-açúcar na Ilha da Madeira, que foi o laboratório para a cultura de cana e de produção de açúcar. Cristóvão Colombo, genro de um grande produtor de açúcar na Ilha Madeira, introduziu o plantio da cana na América, em sua segunda viagem ao continente, em 1493, onde hoje é a República Dominicana (UDOP, 2012).

Oficialmente, foi Martim Affonso de Souza que em 1532 trouxe a primeira muda de cana ao Brasil e iniciou seu cultivo na Capitania de São Vicente. Porém, foi no Nordeste, principalmente nas Capitanias de Pernambuco e da Bahia, que os engenhos de açúcar se multiplicaram (UDOP, 2012).

No século seguinte, o Brasil era o maior produtor e fornecedor mundial de açúcar, posição mantida até o final do século XVII. Historicamente, a cana-de-açúcar sempre foi um dos principais produtos agrícolas do Brasil e atualmente o País é novamente o maior produtor da cultura. Além disso, o Brasil é também o primeiro do mundo na produção de açúcar e etanol (GUIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, 2009).

De acordo com informações do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA, 2014), atualmente existe no Brasil 10.472.169 hectares de área plantada com cana-de-açúcar. A Região Sul representa 717.191 hectares, a Região Sudeste representa 6.685.058 hectares, a Região Centro-Oeste representa 1.806.738, a Região Nordeste representa 1.200.286 e a Região Norte representa 62.896 de área plantada. O Estado de São Paulo é destaque na Região Sudeste, sendo responsável por 53% do cultivo de cana no Brasil, correspondendo à 5.566.584 hectares de área plantada. O estado de Minas Gerais possui, ao total, 949.801 hectares de cultivo de cana-de-açúcar, correspondendo 9% de todo o cultivo no Brasil (SIDRA, 2014). Porém mesmo representando uma parte muito inferior que a do estado de São Paulo, o estado de Minas Gerais possui a segunda maior área plantada com cana-de-açúcar do Brasil, seguido dos estados de Goiás (9%), Paraná (7%), Mato Grosso do Sul (6%), Alagoas (4%) e os demais estados (totalizando 13%).

III. Material e Métodos Para o Mapeamento da Cana de Açúcar em Minas Gerais

A cana-de-açúcar é um cultivo de longa duração e, portanto, convive com todas as estações durante seu ciclo de vida. Os principais fatores climáticos que controlam o crescimento, a produção e a qualidade da cana são temperatura, luz e umidade disponível. A planta vive melhor em áreas ensolaradas, quentes e tropicais (NETAFIM, 2015).

Existe uma relação entre cultura e clima, portanto, a cana deve ser cultivada em locais com condições climáticas específicas, dependendo do produto que se deseja obter (MARIN, 2012).

A temperatura ideal de solo para o brotamento dos toletes de cana-de-açúcar é de 32° a 38°C. Para um crescimento ideal, forte e vigoroso que garanta a alta produção e rendimentos de açúcar, a temperatura média durante o dia deve ser entre 22° a 30°C. A temperatura mínima para o ótimo desenvolvimento vegetativo deve ser aproximadamente 20°C, abaixo desse valor a produção é prejudicada. As chuvas devem ser bem distribuídas, com precipitações de 1.100 a 1500 milímetros por ano (NETAFIM, 2015).

A cana de açúcar é ácida e alcalina, desenvolve em solo com PH entre 4 e 8,5, sendo o ideal em torno de 6,5 (MARIN, 2012).

Existem duas principais fases de desenvolvimento da cana, na fase de crescimento vegetativo, a planta é favorecida pelo clima úmido e quente, com alta incidência de radiação solar e umidade adequada. Temperaturas mais amenas e baixa disponibilidade de água favorecem o acúmulo de sacarose durante a fase de maturação (MARIN, 2012).

A. *Variação solar*

A cana-de-açúcar possui um bom crescimento em áreas que recebem energia solar de 18 a 36 MJ/m². A cana de açúcar é capaz de produzir altos índices fotossintéticos e o processo mostra uma variação de alta saturação em relação à luz. O perfilhamento é afetado por intensidade e duração do brilho do sol. Alta intensidade de luz e longa duração promovem o perfilhamento enquanto dias curtos e nublados afetam de forma inversa. O crescimento do talo aumenta quando a luz do dia está entre uma faixa de 10 a 14 horas. O aumento do índice de área da folha é rápido durante o terceiro e quinto mês, coincidindo com a fase formativa do cultivo e alcança seus valores de pico durante a fase de crescimento precoce (NETAFIM, 2012).

B. Variedade escolhida

As variedades a serem escolhidas devem apresentar as seguintes características: alto índice de produtividade, elevado teor de açúcar (sacarose), e adaptadas às condições edafoclimáticas (condições climáticas, relevo, litologia, temperatura, umidade do ar, radiação, o tipo de solo, o vento, a composição atmosférica e a precipitação pluvial) da região, boa capacidade de rebrota, ausência de florescimento ou flechamento, fácil despalha ou ausência de joçal e resistência à pragas e doenças (TOWNSEND,2000).

Para possibilitar a conciliação de altas produções com elevados valores nutritivos durante todo o período de utilização do canavial é necessário plantar variedades que apresentem diferentes ciclos, ou seja, canas precoces que serão utilizadas mais cedo, logo no início do período seco, e canas de ciclos médios a tardio, que serão cortadas mais para o final do período seco (TOWNSEND, 2000).

C. Fertilidade do solo

A cana-de-açúcar é uma cultura que apesar de se desenvolver em solos de baixa fertilidade ou com condições físicas desfavoráveis, os solos ideais para o desenvolvimento da cana são bem arejados e profundos (até 1,5 metros), com boa retenção de umidade e alta fertilidade. A densidade de 1,1 a 1,4 Mg/m³, com topografia moderada e o valor do pH em cloreto de cálcio deve ser de 6,5 (com intervalo aceitávelde 5 a 8,5). Deve-se evitar solo inundado, salino e alcalino (VIANNA, 2014).

O solo deve ser preparado de maneira uniforme para propiciar condições adequadas de plantio. Deve-se também ser utilizado um subsolador para destruir as camadas de compactação. Além disso, é necessário realizar a aragem ou gradagem pesada, sendo seguidas por gradagens leves para nivelar o solo (NETAFIM, 2015).

Embora tenha sido proposto há mais de um século, o sistema de classificação climática de Köppen, por sua robustez e facilidade de uso, ainda continua sendo largamente utilizado em todo o mundo, tornando-se um poderoso instrumento para nos ajudar a compreender melhor o ambiente que nos cerca (PEEL *ET AL.*, 2007). Segundo a Classificação de Koppen (Figura 1), a cana de açúcar pode ser plantada em praticamente todas as regiões de Minas Gerais
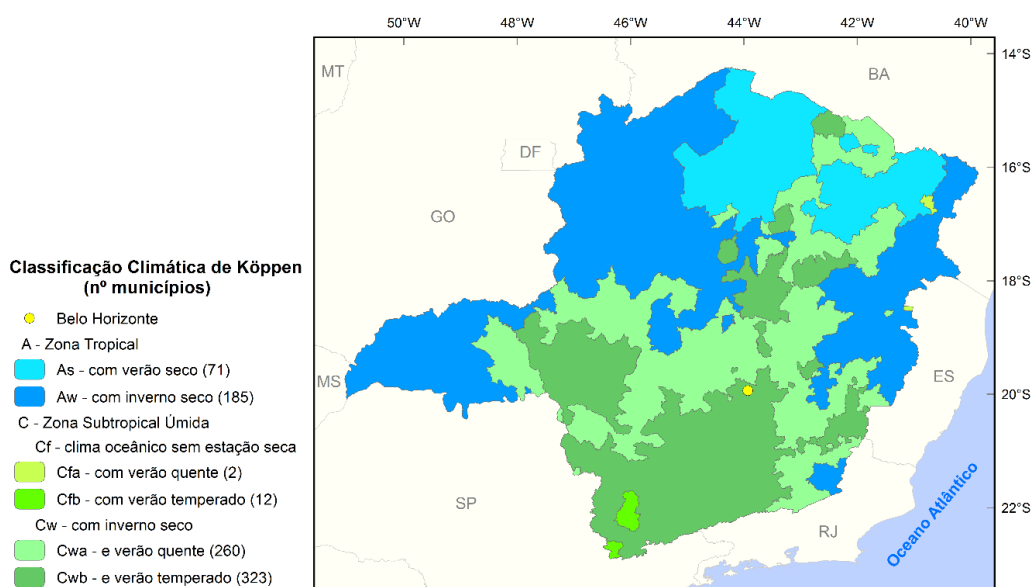
Figura 1 - Classificação climática de Köppen para Minas Gerais. Fonte: CARDOSO et al. (2015).

Os dados utilizados no mapeamento da área com plantio de cana de açúcar em Minas Gerais foram obtidos junto ao Sindicato da Indústria de Fabricação do Álcool no Estado de Minas Gerais (SIAMIG, 2015) e ao Instituto Brasileiro de Geografia (IBGE).

IV. Resultados

De acordo com informações do Sistema IBGE e da SIAMIG, em Minas Gerais, o município com a maior produção de cana-de-açúcar é Uberaba, seguido de Frutal, Conceição das Alagoas e Santa Vitória. A Tabela 1 mostra os municípios que possuem cultivo mais expressivo de cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais.

Como pode ser observada na Tabela 1, a região do Triangulo Mineiro, apresenta os municípios com maior área de cultivo de cana-de-açúcar em Minas Gerais.

A produção de cana de açúcar possui como produtos principais o açúcar e o álcool etílico. Os subprodutos mais importantes são: o bagaço, a vinhaça (também chamado de vinhoto ou restilo), a torta de filtro e a levedura (CORTEZ *ET AL.*, 1992).

Além de ser o maior produtor de açúcar, o Brasil é também o maior produtor e consumidor de álcool etílico do mundo. Também, é o maior exportador de álcool, com perspectivas de crescimento significativas (JÚNIOR, 2012).

Tabela 1 – Municípios de Minas Gerais com o cultivo mais expressivo de cana-de-açúcar

MUNICÍPIO	Área plantada SIAMIG
Uberaba	95052,87
Frutal	74556,63
Santa Vitória	50091,75
Conceição das Alagoas	49528,53
João Pinheiro	43090,11
Campo Florido	39171,69
Iturama	36284,31
Limeira do Oeste	29545,83
Ituiutaba	25748,82
Itapagipe	23441,31
Paracatu	22485,51
Perdizes	20550,24
Pompéu	19847,16
Conquista	19515,78
Canápolis	19498,86
Água Comprida	19238,49
Veríssimo	19132,02
União De Minas	18744,57
Carneirinho	18175,77
São Francisco de Sales	18167,67
Sacramento	17181,45
Uberlândia	15497,1
Monte Alegre de Minas	15276,42
Pirajuba	14262,48
Luz	12990,42
Passos	12845,52
Tupaciguara	12566,7
Lagoa da Prata	12512,97
Bambuí	12205,8
Santa Juliana	12118,41
Araporã	12016,98
Campina Verde	11610,36
Gurinhatã	10922,13
Nova Ponte	10582,56
Prata	9803,88
Planura	9447,03
Jaíba	9257,85
Capinópolis	8524,62
Comendador Gomes	8206,2
Unaí	6846,57
Iguatama	5817,42

MUNICÍPIO	Área plantada SIAMIG
Monte Belo	5621,67
Japaraíba	4908,24
Delta	4815,72
Fronteira	4709,52
Delfinópolis	4514,49
São Pedro dos Ferros	4507,47
Ipiaçu	4396,41
Alfenas	4334,76
São Sebastião do Paraíso	4310,91
Serra dos Aimorés	4274,28
Centralina	3896,73
Bom Despacho	3811,05
Urucânia	2951,73
Araxá	2804,04
Guaranésia	2508,12
Areado	2347,11
Arcos	2295,72
Brasilândia de Minas	2284,02
Varjão de Minas	2282,58
Monte Santo de Minas	2167,2
Presidente Olegário	2111,58
Ponte Nova	2091,78
Ibiá	1998
São Tomás de Aquino	1942,38
Arceburgo	1707,57
Indianópolis	1583,37
Araguari	1401,03
Alpinópolis	1241,01
Guaxupé	1187,28
Ouro Fino	1152,63
Divisa Nova	1105,11
Piedade de Ponte Nova	1002,96
Jacutinga	936,45
Pedrinópolis	935,46
São João Batista do Glória	888,3
Cachoeira Dourada	835,83
Iraí de Minas	797,31
Moema	782,55
Medeiros	723,87
Patos de Minas	712,62
Machado	698,76
São José da Barra	624,42

MUNICÍPIO	Área plantada SIAMIG
Carmo do Rio Claro	594,54
Rio Casca	587,88
Sem-Peixe	587,34
Santa Cruz do Escalvado	576,99
Santo Antônio do Grama	548,64
Monte Sião	492,57
Matias Cardoso	456,48
Serrania	425,16
Capetinga	408,33
Oratórios	391,23
Itamogi	376,74
Santo Hipólito	373,86
São José do Goiabal	359,28
Alterosa	351,54
Cabo Verde	347,58
Jequeri	282,33
São Domingos do Prata	268,38
Cláudio	229,86
Doresópolis	170,28
São Gonçalo do Abaeté	137,52

MUNICÍPIO	Área plantada SIAMIG
Romaria	131,76
Juruaia	126,72
Tapiraí	115,56
Santo Antônio do Monte	109,53
Pratápolis	105,3
Augusto de Lima	87,57
Carmo da Mata	68,67
Piumhi	68,67
Raul Soares	62,37
Jacuí	43,29
Amparo do Serra	39,69
Fortaleza de Minas	37,89
Abaeté	25,74
Tiros	19,17
Itaguara	7,2
Estrela do Indaiá	0,18
Paraguaçu	0,18
Nova Era	0,09

Fonte: SIAMIG, 2015-2016, Adaptado.
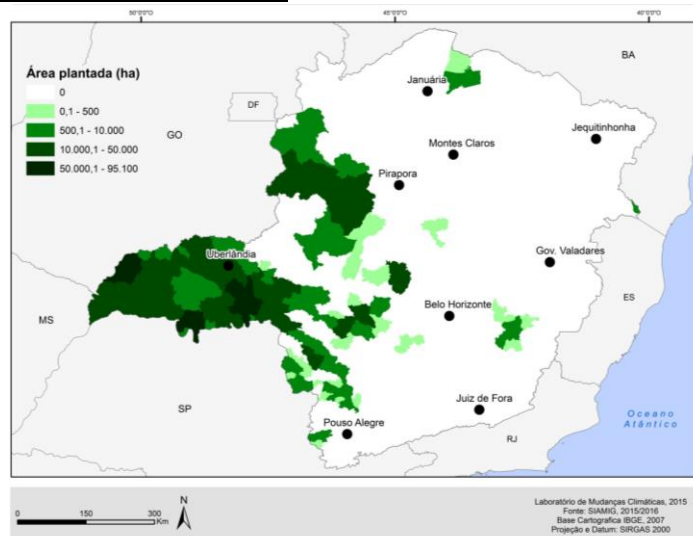
Figura 2 – Mapa de espacialização da área plantada dos municípios de Minas Gerais. Fonte: SIAMIG, 2015-2016.

A. Bagaço da Cana-de-açúcar

Entre os subprodutos da cana, o que tem recebido maior atenção nos últimos anos é o bagaço, principalmente devido à sua utilização como fonte de energia. As usinas são autossuficientes na geração de energia e muitas têm feito investimentos para fornecer o excedente para distribuidoras. A maior compradora atualmente é a Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), pioneira na utilização da biomassa (UDOP,2012).

O bagaço tem sido usado como combustível na usina, pelo menos a partir do início deste século quando passou a substituir a lenha. Atualmente no Brasil existe uma necessidade de ampliar as alternativas de geração de eletricidade. Visto que o potencial de geração de hidroeletricidade na região Centro-Sul encontra-se virtualmente esgotado para grandes barragens, portanto, abrem-se hoje as possibilidades para as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e as termelétricas, entre elas já existentes na indústria que operam o bagaço da cana-de-açúcar (CORTEZ *ET AL.*,1992).

Da energia contida numa tonelada de cana, há cerca de 560.000 kcal em 250 kg de bagaço úmido, 392.000 kcal em 70 litros de álcool e 60.000 kcal em 11.830 litros de biogás (65% de metano) obtidos através da biodigestão da vinhaça.

Isso equivale a dizer que há mais energia na cana-de-açúcar e seus derivados do que se pode conseguir com o álcool isoladamente.

Os problemas do uso do bagaço para fins energéticos incluem:

- Baixa densidade energética (214,8 mil kcal/m³);
- Alta umidade (50% b.u) quando *in natura*;
- Armazenamento difícil;
- Transporte caro;
- Decomposição ao longo do tempo.

No entanto, a umidade excessiva do bagaço *in natura* (50% b.u.) e a baixa densidade são os fatores que mais limitam seu uso de forma mais abrangente (CORTEZ *ET AL.*, 1992).

Uma tonelada de cana gera cerca de 320 kg de bagaço, do quais 90% são usados na produção de energia. A importância da cogeração de energia utilizando o bagaço reside no fato de que ela coincide com o período de seca dos reservatórios das usinas hidrelétricas e, dessa forma, possui importante caráter complementar (NEVES, 2007).

A capacidade de cogeração de energia com o bagaço, para produção de açúcar e álcool e exportação do excedente, é atualmente de 1650 MW ou 2% da demanda nacional. No entanto, o aproveitamento de todo potencial energético do bagaço está longe do ideal, muito por conta do uso apenas de parte da produção de bagaço e do desperdício de energia com as tecnologias intermediárias e obsoletas apresentadas pelas termoelétricas das usinas. O potencial de cogeração de energia para 2012, com aproveitamento de 50% do bagaço, é de 9 mil MW ou 8% da demanda nacional projetada (NEVES, 2007).

O bagaço de cana-de-açúcar também possui utilizações não energéticas. Um dos usos não energéticos do bagaço de cana é a utilização do mesmo para a fabricação de placas de aglomerados. O uso de aglomerados é crescente no mundo fazendo-se necessário investigar substitutos para a madeira como matéria-prima, devido ao fato da madeira ser escassa e cara. Segundo as experiências relatadas o bagaço é um dos melhores materiais para substituir a madeira como matéria-prima, pois apresenta excelentes propriedades com respeito à resistência com e sem influência de umidade. Além disso, com o bagaço o uso de resina é diminuído o que representa um importante fator econômico. Finalmente, é possível fabricar estrutura autoportantes de baixa densidade para construção civil (CORTEZ *ET AL.*, 1992).

Outra aplicação de grande interesse é a hidrólise do bagaço para ração animal. A experiência na Destilaria Alcídia realizada pela CALDEMA onde em escala piloto desde 1984 se mantém 400 cabeças de gado confinadas com bagaço hidrolisado processa-se o bagaço elevando sua temperatura e pressão numa autoclave. No processo, celulose, hemicelulose e especialmente lignina se transformam em material digerível pelo animal. Nesse processo a digestibilidade do bagaço passa de 23% a 69% (CORTEZ *ET AL.*, 1992).

A cana de açúcar apresenta potencial para cogeração de energia. Para a cana de açúcar foi proposto três cenários para geração de energia por meio dos resíduos dessa cultura: 30 kW/t cana (Admite-se a operação do sistema ocorra somente durante a safra com os resíduos gerados. Período de abril a novembro, o que resulta em 5563 horas de operação por um ano. Representa o potencial energético da cana de açúcar no estado, levando-se em conta o primeiro cenário).

B. CENÁRIO 1 - 30KW/TONELADA DE CANA MOÍDA:

Equação 1 – Cenário um do potencial energético do resíduo da cana de açúcar (CENBIO, 2008).

$$Potencial_{cenário\ 1} = \frac{t_{cana} * 30kWh/t}{1000 * 5563} \quad (1)$$

Admite-se a operação do sistema ocorra somente durante a safra com os resíduos gerados. Período de abril a novembro, o que resulta em 5.563 horas de operação por ano. A Figura 11 representa o potencial energético da cana de açúcar no estado, levando-se em conta o primeiro cenário.
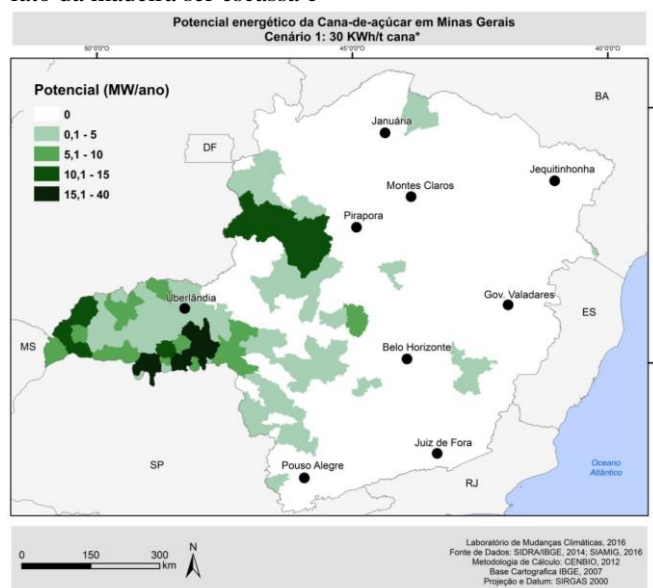
Figura 11 - Perspectiva do primeiro cenário - Potencial energético do resíduo da cana de açúcar.Fonte: SIDRA/IBGE, 2014; SIAMIG, 2015-2016.

C. CENÁRIO 2 - 60KW/TONELADA DE CANA MOÍDA:

Equação 2 - Cenário dois do potencial energético do resíduo da cana de açúcar (CENBIO, 2008).

$$Potencial_{cenário\ 2} = \frac{t_{cana} * 60kWh/t}{1000 * 5563} \quad (2)$$

Admite-se a operação do sistema ocorra somente durante a safra com os resíduos gerados. Período de abril a novembro, o que resulta em 5.563 horas de operação por ano. A Figura 4 representa o potencial energético da cana de açúcar no estado, levando-se em conta o segundo cenário.
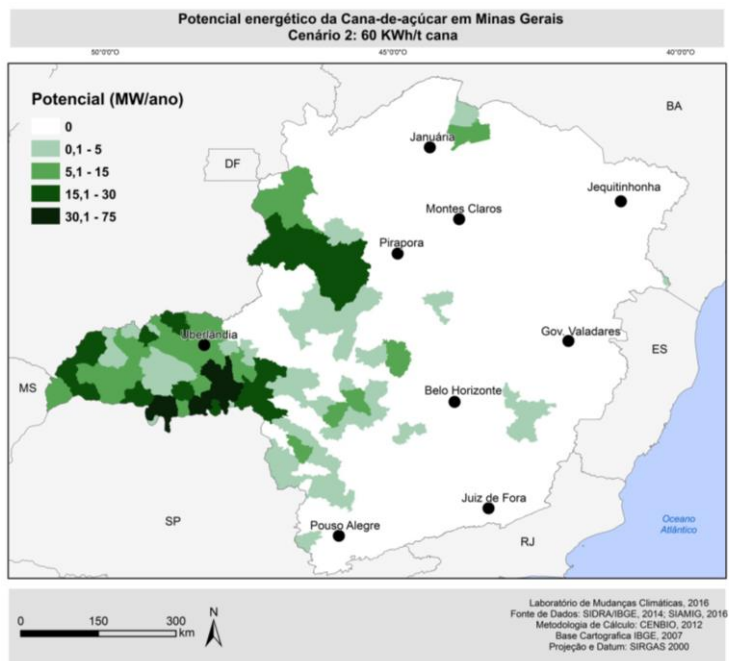
Figura 4 - Perspectiva do segundo cenário - Potencial energético do resíduo da cana de açúcar. Fonte: SIDRA/IBGE, 2014; SIAMIG, 2015-2016.

D. CENÁRIO 3 – 120 KW/TONELADA DE CANA MOÍDA:

Equação 3 – Cenário três do potencial energético do resíduo da cana de açúcar (CENBIO, 2008).

$$Potencial_{cenário\ 3} = \frac{t_{cana} * 120kWh/t}{1000 * 8322} \quad (3)$$

Admite-se a operação do sistema ocorra durante o ano todo com os resíduos gerados e que a operação ocorra em 95% das horas anuais, o que resulta em 8.322 horas de operação por ano. Nesse caso levam-se em conta, além do bagaço, a palha e as pontas, resultantes da colheita da cana crua. A Figura 5 representa o potencial energético da cana de açúcar no estado, levando-se em conta o terceiro cenário.
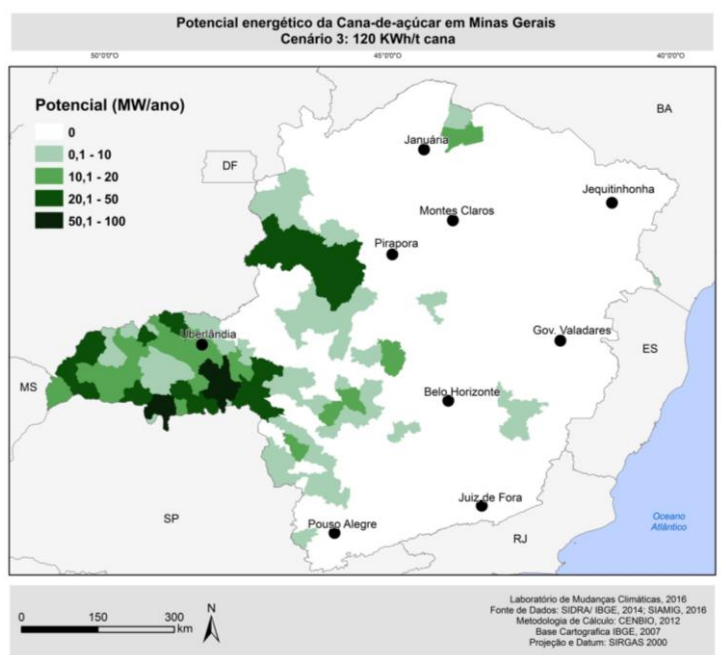
Figura 5 - Perspectiva do terceiro cenário - Potencial energético do resíduo da cana de açúcar. Fonte: SIDRA/IBGE, 2014; SIAMIG, 2015-2016.

De acordo com informações da SIAMIG, Minas Gerais possui atualmente 35usinas de cana de açúcar em operação. A Tabela 2 demostra as usinas de cana-de-açúcar presentes no estado. A Figura 6 especializa tais dados.

Tabela 2 – Usinas de cana-de-açúcar em Minas Gerais. Fonte: SIAMIG, 2016

Usinas em operação	Municípios
Agropéu- Agroindustrial de Pompéu S/A	Pompéu-MG
Araporã Bioenergia	Araporã-MG
Bioenergética Aroeira Ltda	Tupaciguara - MG
Bioenergética Vale do Paracatu Ltda- BEVAP	João Pinheiro- MG
BIOSEV Bioenergia- Unidade Lagoa da Prata	Lagoa da Prata- MG
Vale do Pontal Açúcar e Álcool S/A	Limeira do Oeste- MG
Usina Coruripe Açúcar e Álcool S/A- Unidade Campo Florido	Campo Florido-MG
Usina Coruripe Açúcar e Álcool S/A- Unidade Carneirinho	Carneirinho - MG
Usina Cerradão Ltda	Frutal - MG
Delta Sucroenergia - Unidade Conquista de Minas	Conquista - MG
Destilaria Antônio Monti Filho Ltda- DAMFI	Canápolis-MG
Destilaria de Álcool Serra dos Aimorés S/A - DASA	Serra dos Aimorés- MG
Delta Sucroenergia - Unidade Delta	Delta - MG
BUNGE - Usina Frutal Açúcar e Álcool S/A	Frutal - MG
BUNGE - Usina Itapagipe Açúcar e Álcool S/A	Itapagipe - MG
BP - Ituiutaba Bioenergia Ltda	Ituiutaba - MG
Usina Coruripe Açúcar e Álcool S/A- Unidade Iturama	Iturama- MG
Usina Jatiboca - Unidade Ponte Nova	Urucânia - MG
Usina Coruripe Açúcar e Álcool S/A- Unidade Limeira do Oeste	Limeira do Oeste- MG
Adecoagro- Usina Monte Alegre	Monte Belo- MG
Usina Açucareira Passos S/A	Passos
Destilaria Rio do Cachimbo Ltda	João Pinheiro- MG
Sada Bio-energetica Ltda - Usina São Judas Tadeu	Jaíba-MG
BUNGE - Agroindustrial Santa Juliana S/A	Santa Juliana - MG
Santa Vitória Açúcar e Álcool S/A	Santa Vitoria- MG
Usina Santo Ângelo Ltda	Pirajuba-MG
Bambuí Bioenergia S/A	Bambuí-MG
Usina Uberaba S/A	Uberaba-MG
Companhia Energética Vale do São Simão - Grupo Andrade	Santa Vitoria- MG
Vale do Tijuco Açúcar e Álcool S/A	Uberaba-MG
Destilaria Veredas	João Pinheiro- MG
Delta Sucroenergia - Unidade Volta Grande	Conceição das Alagoas - MG
Destilaria Vale do Paracatu Agroenergia Ltda - VPA	Vale do Paracatu- MG
WD Agroindustrial Ltda	João Pinheiro- MG
Destilaria Cachoeira LTDA	Tupaciguara - MG
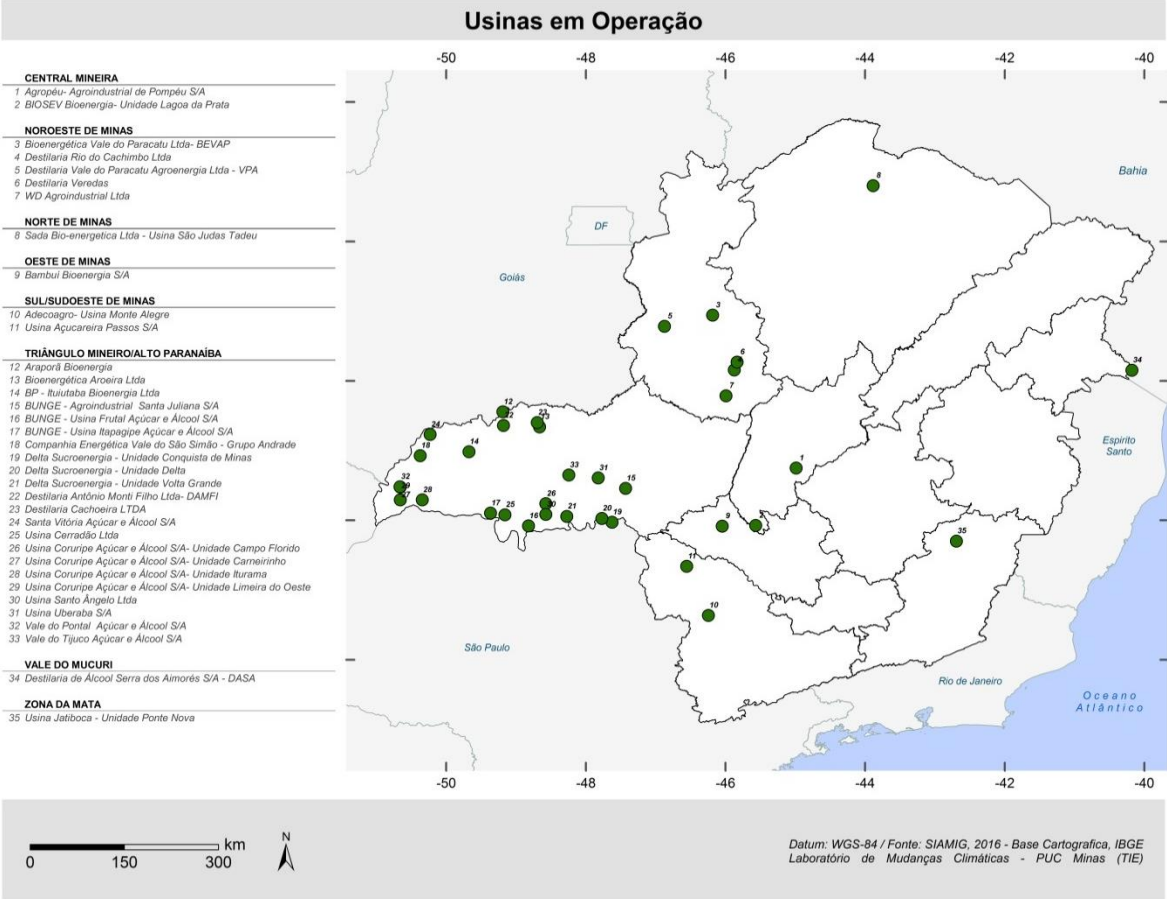
Figura 6 – Usina em operação de cana de açúcar. Fonte: SIAMIG, 2016.

V. Conclusões

A região com maior potencial de geração de energia elétrica a partir do bagaço da cana de açúcar é o Triângulo Mineiro, onde já se encontra a maior concentração de usinas para o processamento da cana. A região do Triângulo além de propiciar um tipo de solo favorável, também possui relevo plano que facilita a utilização de mecanização e clima chuvoso.

Os locais onde possuem usinas de processamento de cana de açúcar são propícios para instalação de plantas para cogeração de energia elétrica por apresentarem grande quantidade de matéria prima (bagaço) concentrada na mesma região.

Os municípios que se destacaram com elevado potencial para produção de energia elétrica a partir do bagaço da cana foram: Uberaba, Frutal, Santa Vitória, Conceição das Alagoas, João Pinheiro e Campo Florido.

VI. Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. ANP/SEE, 2002. **Fatores De Conversão, Densidades E Poderes Caloríficos Inferiores.**

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: Nov. 2015.

BIZZO, W. A. **Tecnologias da biomassa para conversão de energia.** In: DIVERSIFICAÇÃO ENERGÉTICA: uma estratégia de desenvolvimento para o Rio Grande do Norte. Natal: UFRN, 2007.

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Classificação Climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal. **Acta Geográfica**, v. 8, n. 16, p. 40-55, 2015.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA - CENBIO. **Atlas de Bioenergia do Brasil.** 1999.

CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPPI, J.. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, v. 2, n. 2, p. 111, 1992.

GUIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, C. I. B. **Avanço científico beneficia o país.** Conselho de Informações sobre Biotecnologia. 2009. 20p.

JÚNIOR, J.. 2012. **Tecnologia da fabricação do álcool**. p. 74, 2012.

MACHADO, S.. **Tecnologia da fabricação do açúcar.** p. 55, 2012.

MARIN, F. R.. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica**. 2012.

NETAFIM, 2015 – **Clima.** Disponível em: <http://www.sugarcanecrops.com/p/climate>. Acesso em: Mai. 2016.

NEVES, M. F.; CONEJERO, M. A.. Sistema agroindustrial da cana: cenários e agenda estratégica. **Economia aplicada,** v. 11, n. 4, p. 587-604, 2007.

NOVA CANA, 2016. **Anidro ou Hidratado:** diferenças. Disponível em: <https://www.novacana.com/etanol/anidro-hidratado-diferencas>. Acesso em: Out. 2016.

RODRIGUES, L. D. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis:** impactos ambientais e o zoneamento agro-ecológico como ferramenta para mitigação. Monografia de Especialização em Análise Ambiental da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, p. 7-10, 2010.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DO ÁLCOOL NO ESTADO DE MINAS GERAIS - SIAMIG, 2015. **Banco de dados de monitoramento da safra 2015**.

SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA - SIDRA, 2014. **Produção Agrícola Municipal** - Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=291&z=p&o=30>. Acesso em: Out. 2016.

TOLMASQUIM, M. T. (Coord.). **Energia Renovável:** Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

TOWNSEND, C. R. **Recomendações técnicas para o cultivo da cana-de-açúcar forrageira em Rondônia.** Embrapa Rondônia, 2000.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - ÚNICA, 2015. Disponível em: <http://www.unica.com.br/unica/?idioma=1>. Acesso em: Out. 2016.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA - UDOP, 2012. Disponível em: <http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=907>. Acesso em: Mar. 2016.

VIANNA DOS SANTOS, M. **Risco climático para a cultura da cana-de-açúcar e estratégias de manejo de irrigação complementar para a sua minimização em diferentes regiões brasileiras.** 2014. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

VII. COPYRIGHT